

Tartu Ülikool

Loodus- ja tehnoloogiateaduskond

Ökoloogia ja maateaduste instituut

Geograafia osakond

Bakalaureuse töö geoinformaatikas ja kartograafias

**VÕIMALIKUD VIISID VOORTE TUVASTAMISEKS GIS-
TARKVARAGA LIDARI KÕRGUSMUDELILT**

Risto Ülem

Juhendaja: PhD Raivo Aunap

Kaitsmisele lubatud:

Juhendaja:

Osakonna juhataja:

Tartu 2015

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Voored	4
1.1. Saadjärve voorestik	6
1.2. Kolga-Jaani voorestik	6
2. Lähenemised pinnavormide eristamiseks	8
2.1. Välitööd	8
2.2. Horisontaalid	8
2.3. Satelliitpildid	9
2.4. Objekt-orienteeritud lähenemine	10
2.5. Pikslipõhine lähenemine	11
2.6. Resolutsiooni valik	12
2.7. „Küpsise vormi“ meetod voorte eraldamiseks kõrgusmodelilt	12
3. Voorte piiritlemise väljatöötamise protsess	14
3.1. Andmed	14
3.2. Voorte piiritlemise metoodika	15
3.2.1. Voorte harjade leidmine	15
3.2.2. Voorte kuju leidmine negatiivis DEMiga	16
3.2.3. Voorte kuju leidmine kõrgpääs- ja madalpääsfiltriga	16
3.2.4. Voorte kuju leidmine nõlva kallakuse abil	17
3.2.5. Voorte kuju leidmine mullakaardi abil	18
4. Tulemused ja arutelu	19
4.1. Harjade eraldamine	19
4.2. Voorte kuju leidmine negatiivse DEMiga	22
4.3. Voorte kuju leidmine kõrgpääs- ja madalpääsfiltritega	24
4.4. Voorte kuju leidmine nõlva kallakuse abil	26
4.5. Voorte kuju leidmine mullakaardi abil	28
4.6. Kombineeritud voorte piiritlemine	30
Kokkuvõte	32
Tänuavaldused	33
Summary	34
Kasutatud kirjandus	35
Lisad	37
Lisa 1	38
Lisa 2	40
Lisa 3	42

Sissejuhatus

Eesti pinnamoodi on kõige rohkem kujundanud mandriliustikud, mis on endast maha jätnud väga erinevas suuruses pinnavorme, alustades suurtest saarkõrgustikest nagu Haanja ja Otepää, lõpetades väiksemate vormidega nagu oosid, mõhnad ja voored. Liustikuliste pinnavormide uurimine annab olulist teavet kunagiste maapinda vorminud liustike kohta. Nende mõõtmine ja mahu arvutamine võimaldab täpsemalt saada aimu kunagiste liustike energiast, liikumisest ja mahust.

Pinnavormide (pool)automaatne tuvastamine arvutiekraanilt nende mõõtmiseks ja mahu arvutamiseks on tänapäeval palju tähelepanu pälviv geomorfoloogia haru. Tarkvaraline tehnoloogia on väga kõrgel tasemel ja võimaldab sooritada arvutusi väga kiiresti. Seetõttu on pinnavorme uurivate teadlaste tähelepanu nihkunud välitöödel pinnavormide piiritlemiselt arvuti taga pinnavormide tuvastamisele. Üheks selliseks tarkvaraks, mida kasutatakse ka käesolevas töös, on GIS. Välitööd on siiski ainukeseks viisiks pinnavormide siseehituse uurimiseks ja seeläbi nende tegeliku geneesi teadasaamiseks.

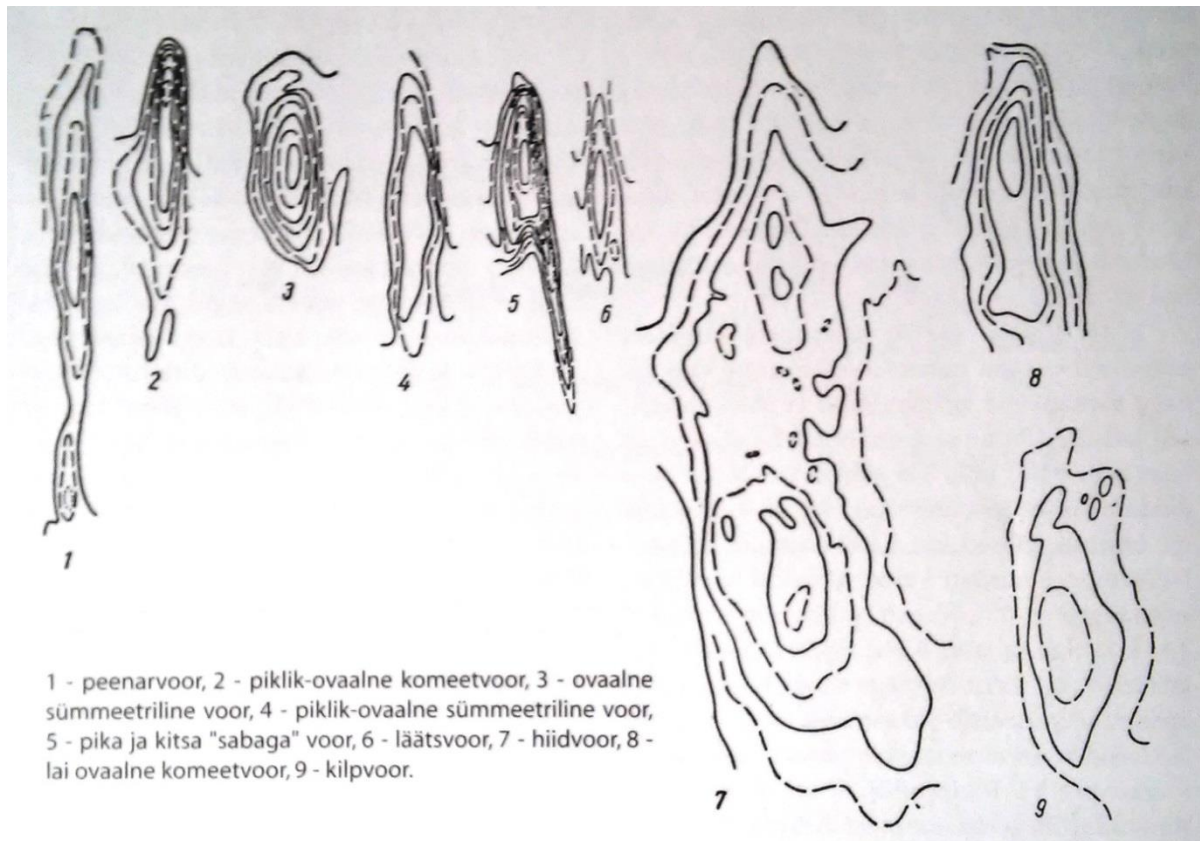
Liustikulistest pinnavormidest on voored oma geomorfomeetriselt ehituselt ühed kõige lihtsamad pinnavormid ja seetõttu on neid proovitud kõige enam arvutis piiritleda. Siiski ei ole suudetud siiani ühtset ja täielikult töötavat lahendust välja pakkuda. See näitab, et isegi suhteliselt lihtsa põhikujuga pinnavormide, nagu voorte, eristamine on keeruline ja nõuab põhjalikku meetodite analüüsi. Käesoleva töö eesmärgiks ongi analüüsida võimalikke voorte tuvastusmeetodeid GIS-tarkvaraga ja leida moodus, kuidas analüütiliste meetoditega tuvastada LiDARi pildilt uurimisalasse jäävad potentsiaalsed voorteks kvalifitseeruvad pinnavormid nende morfomeetria alusel. Uurimisalaks valiti Saadjärve voorestik (Vooremaa), mis on Ida-Euroopa lauskmaa üks tähelepanuväärsemaid. Seal on esindatud väga mitmekesise kujuga suurvoored. Teiseks vaatlusaluseks voorestikuks võeti Kolga-Jaani, mis on esindatud väikevoortega. Kõrgusmudel on saadud LiDARi kõrgusandmetest. LiDAR on üks täpsemaid vahendeid kõrgusmudeli tegemiseks, kuna toob detailselt välja pinnavormide kuju.

1. Voored

Voored on olnud teadlaste uurimisobjektiks juba viimased poolteist sajandit, siiski jätkub seniajani arutelu nende tekkeprotsesside üle (Rattas, 2004). Rõuk (1974: 8) on defineerinud voored järgmiselt:

„Voored on ovaalse või piklik-ovaalse põhikuju ning ebasümmeetrilise või sümmeetrilise pikiprofiiliga radiaalkünnised ja –seljakud, mis koosnevad valdavalt moreenidest ja on tekkinud aktiivse liustiku voolival toimel.“

Voorte kuju on meenutanud teadlastele ovaalseid künkaid, väljavenitatud mägesid, poolikut muna, vihmapiiska ja isegi poolikut torpeedot või sigarit (Hillier ja Smith, 2012). Ideaalis on voored piklik-ovaalse põhikujuga, mille proksimaalne osa on laiem ja kõrgem ning distaalne osa on laugem ja kitsam. Voorte suhteliselt lihtsa kuju järgi peaks neid olema kerge tuvastada. Tegelikkuses esineb voortel väga palju erinevaid vorme. Rõuk (1974) on Vooremaa voorestikus eristanud 9 tüüpi voori (joonis 1): peenarvoor, piklik-ovaalne komeetvoor, ovaalne sümmeetriline voor, piklik-ovaalne sümmeetriline voor, pika ja kitsa „sabaga“ voor, läätsvoor, hiidvoor, lai ovaalne komeetvoor ja kilpvoor. Kujult kõige ebatraditsioonilisemaks võib pidada „sabaga“ voori ja hiidvoori. Kõige tavalisemad on komeetvoored, mis Chorley (1959) järelalusel takistavad kõige vähem jää liikumist. Küllaltki omanäolised on ka pikad ja kitsad peenarvoored, mis Rõugu (1974) arvates on voorte ja voorjate künniste ehk drumlinoidide üleminekuvormid. Voored võivad olla ka liitunud ja asetseda üksteise peal, mis teeb voorte tuvastamise raskeks. Voorte pinnal esineb väiksemaid ebatasasusi sulglohkude, mõhnade, moreenikühmude ja muu sellise näol (Rõuk, 1974).



Joonis 1. Voorte erinevad kujud Saadjärve voorestikus (Rõuk, 1974).

Voorte pikkus varieerub suuresti, ulatudes 100 meetrist kümnete kilomeetriteni. Laius võib samuti ulatuda mõnekümnest meetrist kuni paari kilomeetrini ning kõrgus 50 meetrini ja rohkem. Nõlvad on enamasti lauged mitte üle 5° ja laed on siledad (Rõuk, 1974). Harilikult moodustavad voored mitmetest voortest koosnevaid voorestikke ning voorte vahele jäävad järved või soostunud alad.

Aroldi (2005) järgi ümbritseb voori kitsas üleminekuriba parasniisketelt muldadel madalloomuldadeks. Voortevahelistes madalates ja nõgusates osades on halvema loodusliku drenaaži tõttu pinnas niiskem, mistõttu on seal soodustatud gleistumine ja vastavate muldade kujunemine. Kohtades, kus liigniiskust on rohkem (voortevahelised sügavad nõod), tekib soostumine ja turvastumine ning nendele protsessidele vastavad mullad (Arold *et al.*, 1976). Seetõttu saab hästi koostatud mullakaarte kasutada voorte piiritlemiseks.

Kuigi voori on uuritud juba väga kaua ja voorte kohta on avaldatud üle 1300 uurimistöö, ei ole teadlased kindlat voorte tekkemehhanismi välja selgitanud (Clark *et al.*, 2009), kuna nende kujunemist ei ole võimalik vaadelda. Voorte kujunemise teooriad on Saha (2010) jaganud kolmeks: kuhjeline, kulutav ja deformeeriv. Rõugu (1974) arvates on voored kujunenud liustiku kulutus- ja kuhjelise tegevuse dünaamilise tasakaalu tingimustes. Voorte erinev kuju

ja mõõtmel sõltuvad voorte kujunemise erinevast kestusest ning erinevatest paleoglatsioloogilistest, geoloogilistest ja geomorfoloogilistest tingimustest. Seetõttu leidub voortel suur hulk üleminekuvorme ning tuleb pidevalt mõelda, mida lugeda vooreks ja mida lihtsalt laineks radiaalselt liigestatud moreentasandikul (Rõuk, 1974). Voored koosnevad enamasti moreenist. Moreenikihtide vahele võivad jääda glatsiofluviaalsete setete kihid. Voortel võivad olla ka aluspõhjalised tuumikud, mille peal on moreenist kate.

1.1. Saadjärve voorestik

Antud uurimus keskendub peamiselt Saadjärve voorestiku (Vooremaa) voorte piiritlemisele, mis Rõugu (1974) järgi on ühed suurematest kogu Ida-Euroopa lauskmaal. Saadjärve voorestik on tekkinud korduva liustiku pealetungi ja taganemise tagajärjel Pandivere kõrgustiku taha. Voorestiku katte moodustavad hilisvaldai ehk viimase jäätumise setted ja tuumiku peamiselt keskpleistotseeni vanusega moreenid (Rõuk, 1976). Kujult meenutab Vooremaa veepiiska või pisarat, mis on tekkinud kahelt poolt ümber Pandivere kõrgustiku tulnud liustike liitumise tagajärjel, mis surus Vooremaa lõunaosa kokku kitsaks sabaks.

Vooremaa ulatub Alutaguse madaliku lõunapiirilt Kõrvekülani. Pindala on 977 km², pikkus 55 km ja laius Siimustist Tormani 24 km. Voorestiku moodustavad ligi 100 voort, mille pikkus on 2,5-5 km, laius 0,5-0,8 km ning kõrgus 20-40 m (Arold, 2005). Kuju poolest on voored väga mitmekesised (joonis 1). Kuna Vooremaad kujundasid mitmed jäätumised, koosnevad voored erinevatest settekihtidest ja jääsulamisvee kruusadest. See teeb ka Vooremaa pinnavormide geneesi uurimise ja pinnavormide liigitamise keerukamaks.

Uurimuse ala ei hõlma siiski kogu Saadjärve voorestikku, vaid piirdub põhikaardi ruuduga 54.

1.2. Kolga-Jaani voorestik

Kontrollimaks, kas väljatöötatud meetodid sobivad ka teistsugustes voorestikes olevate voorte piiritlemiseks, valiti teiseks vaatlusaluseks voorestikuks Kolga-Jaani voorestik Võrtsjärve nõos, mis Rõugu (1990) arvates on üks ilmekamaid väikevooremaastikke Eestis. Voorestik ulatub Võrtsjärve põhjakaldalt umbes 30 km pikkuse ja 10 km laiuse vöötmena loodesse, Kõo ning Loopre ümbrusse. Voorestiku pindala on umbes 250 km² ning see koosneb ligi 200 voorest ja voorjast künnisest. Voorte kõrgus on enamasti alla 10 meetri, pikkus 500-1500 meetrit, laius 100-300 meetrit ja kõrgus 3-5 meetrit. Voored koosnevad peamiselt viimase

jäätumise moreenist, kuid on ka üksikuid aluspõhjalise tuumikuga voori. Kuna Kolga-Jaani voorestik oli jääpaisjärve poolt üleujutatud, katab voori õhuke järveliste setete kiht (Rõuk, 1990). Võrreldes Saadjärve voorestikuga on voored väiksemad ja madalamad, kuid siiski väga mitmekesised. Enamasti on voored väga tugevalt väljavenitatud, meenutades saleda kujuga lauget valli, kuid leidub ka järsema liustikupoolse otsaga komeetvoori ning sümmeetrilise pikiprofiiliga künniseid. Samuti võivad voored olla külge- või otsapidi liitunud (Rõuk, 1990).

2. Lähenemised pinnavormide eristamiseks

Kõige varasemad meetodid pinnavormide piiritlemiseks olid topograafilistele kaartidele käsitsi joonistatud horisontaalide uurimine. Seal, kus horisontaalid moodustasid piklikke suletud kontuure, võis arvata olevat voore. Kusjuures muutuvaid faktoreid, mis mõjutavad voorte suurust, on väga palju, alustades kaardi täpsusastmest (Napieralski ja Nalepa, 2009), lõpetades joonestaja enda täpsuse ja vilumusega. Tänapäeval on kontuuride uurimine endiselt aktuaalne, kuid kasutusele on võetud ka teisi vahendeid pinnavormide jalamite tuvastamiseks ja enamasti kasutatakse selleks kõrgusmudeleid (ingl k – *DEM – digital elevation model*).

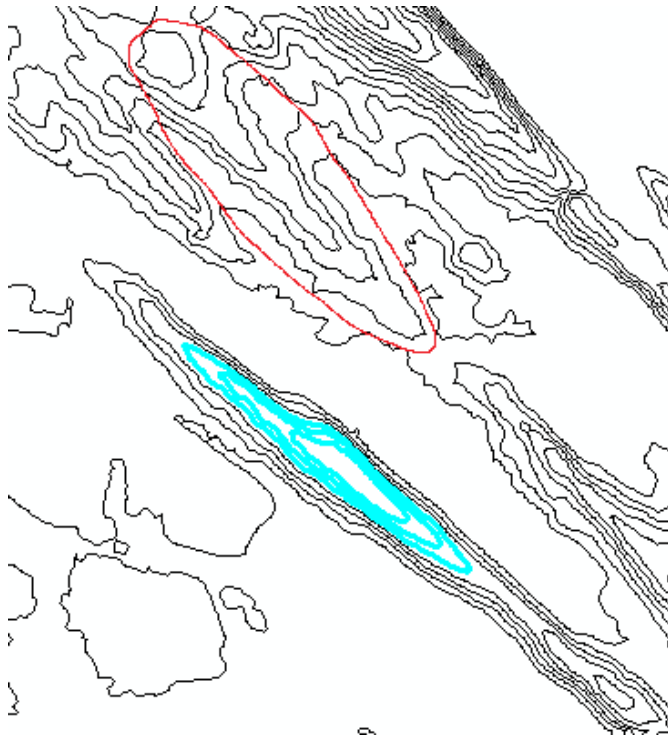
2.1. Välitööd

Välitööd on ainuke sisuline viis teada saamaks pinnavormide geneesi ja läbi selle nende täpset liigitust. Seetõttu ei suuda arvuti kunagi 100% täpsusega pinnavorme üksteisest tuvastada, kuna ei näe pinnavormide sisse. Sellele vaatamata on Saha (2010) välja toonud mitu aspekti, mis räägivad välitööde kahjuks. Välitööd on väga aeganõudvad ning sõltuvad tegija ja aparatuuri täpsusest ning kogemusest. Hoonete, teede ja metsa tõttu on raske pinnavormide jalamit tuvastada ning samuti segavad need mõõtmiskäiku. Suurte vormide ümbermõõtu ja kõrgust on raske mõõta. Smith ja Wise (2007) lisavad veel, et paljudesse kohtadesse on välitööde tegemiseks keeruline pääseda. Siiski on välitööd ainuke viis kontrollimaks, kas arvutiga leitud pinnavormid vastavad ka siseehituselt uuritavatele vormidele.

2.2. Horisontaalid

Tänapäeval saab horisontaale GIS-keskkonnas arvutikäskluste abil arvutada digitaalselt kõrgusmudelilt ja horisontaalide vahe võib kasutaja ise määrata. Seejärel on võimalus valida välja kontuurid, mis on kinnised ja kujult meenutavad voori. Seda tegid ka Napieralski ja Nalepa (2009), pannes horisontaalide vaheks 1 meetri ja identifitseerides voori kõige alumise kinnise kontuuriga. Voore jalam aga ei pruugi olla seal, kus on viimane kinnine horisontaal ja voort ei pruugi saadagi piiritleda kinniste ovaalsete horisontaalidega. Joonisel 2 on illustreeritud, kuidas voore jalam on kaugemal kui viimane kinnine horisontaal ja punase ovaaliga on märgitud voor, mida ei saa piiritleda kinniste horisontaalidega. Selle puuduse tõid Napieralski ja Nalepa oma uurimuses ka ise välja, lisades juurde, et sellise lähenemise juures

tekib probleem ka liitunud voorte piiritlemisega. Siiski saab horisontaale kasutada teiste meetodite kontrolliks ja neid ei peaks täiesti tähelepanuta jätma.



Joonis 2. Punase ovaaliga on märgitud voor, mida ei saa piiritleda kinniste horisontaalidega, sinisega on märgitud kinnised horisontaalid, mille ümber on voore tegelikku jalamit märkivad lahtised horisontaalid.

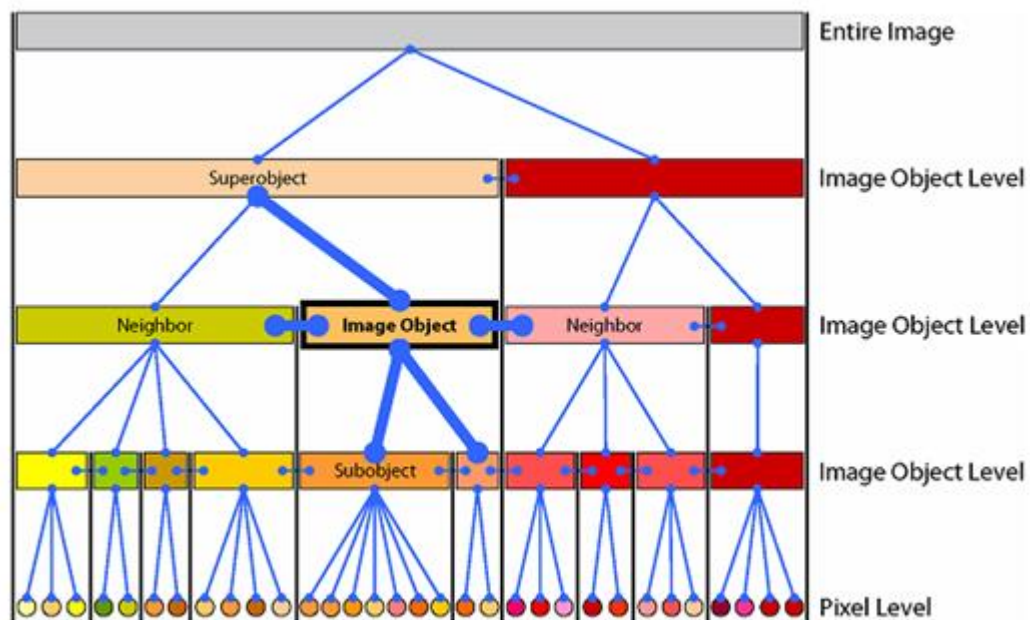
2.3. Satelliitpildid

Satelliitpilte on kasutatud liustikutekkeliste pinnavormide kaardistamiseks alates 1950. aastast, kui satelliitpildid muutusid kättesaadavamaks (Smith ja Wise, 2007). Järjest paremaks on läinud ka satelliitide lahutusvõime (kuni 0,5 m piksli küljepikkus), mis võimaldab järjest paremini pinnavorme piltidelt kaardistada. Satelliitpiltide kasutamine on üks odavamaid meetodeid, kuna enamus neist on vabalt kättesaadavad ja nad katavad väga suuri alasid. Siiski tuleb kõigepealt arvestada sellega, et pilvevabu pilte mingist kindlast alast võib olla keeruline saada. Smith ja Wise (2007) tõid välja veel sensori füüsikalistest ja spektraalsetest karakteristikutest tulenevad probleemid nagu näiteks piltide asimuut ja valgustatus. Nende tööst tuli välja, et erineva asimuudi ja nurga alt valgustatud piltidest tehtud kõrgusmodelid tõid nähtavale erineva kuju ja suurusega voored ning osad vormid kadusid hoopis ära. Kõrgusmudeleid on võimalik kunstlikult arvutis valgustada sobiva nurga all ja ka mitmete

nurkade alt korruga, kuid siiski jääb küsimus, kas kõik pinnavormid tulevad esile nii nagu nad looduses on. Smith *et al.* (2006) võrdlesid voorte piiritlemisel erinevaid kaugseire andmetel tehtud kõrgusmudeleid ja satelliitpilte, kuid ei suutnud satelliitpildilt voori tuvastada.

2.4. Objekt-orienteeritud lähenemine

Objekt-orienteeritud pildi-analüüs (ingl k – *OBIA* – *object-based image analysis*) on kõige uuem ja paljutöotavam viis pinnavormide tuvastamisel. Selle kasutus pinnavormide piiritlemisel teadlaste hulgas järjest suureneb (Saha ja Munro-Stasiuk, 2009, Eisank *et al.*, 2014, d'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2013). OBIA põhineb pikslite grupeerimisel kindlate tunnuste (näiteks värv, kuju, suurus, tekstuur jne) alusel objekti klassidesse ning seejärel omistatakse igale objektile ja klassile kindel väärtus. Erinevalt pikslipõhisest klassifitseerimisest, kus kõigepealt klassifitseeritakse ühesuguse väärtusega pikslite grupid, ja nende põhjal määratakse objekti suurus, leitakse OBIA-s kõigepealt objektid ja siis klassifitseeritakse need (Dragut ja Eisank, 2011). OBIA võimaldab pikslite gruppe ehk objekte paigutada alamklassidesse ja siduda neid naaberobjektidega (joonis 3), mis pikslipõhisel pildi-analüüsil on võimatu ja mis annab juurde paindlikust (Definiens, 2007).



Joonis 3. Objektide hierarhia OBIA programmis Definiens Developer 7 (Definiens, 2007).

Pikema ülevaate kaugseires objekt-orienteeritud pildi-analüüsi kasutanud tööst on pikema ülevaate teinud Blaschke (2010). OBIA-t voorte leidmiseks on kasutanud näiteks Saha ja

Munro-Stasiuk (2009), Eisank *et al.* (2014) ning d'Oleire-Oltmanns *et al.* (2013), kes kõik on proovinud voori tuvastada 30 kuni 5 meetrise piksli servaga kõrgusmodelilt. OBIA kasuks räägib fakt, et sellega on potentsiaalselt võimalik pinnavormide jalameid tuvastada (Eisank *et al.*, 2014). Protsess koosneb kolmest osast:

- 1) segmentide leidmine, milleks enamasti kasutatakse MRS (ingl k *multiresolution segmentation*) algoritmi;
- 2) leitud segmentide klassifitseerimine;
- 3) kvaliteedi kontroll.

Kuna MRS sõltub mõõtkavast, millest omakorda sõltub pinnavormide suurus, tuleb seda kasutada mitmes erinevas mõõtkavas, et piiritleda erinevas suurusel voori. Mõõtkava valimine on üks probleemsemaid kohti OBIA rakendamisel. Teiseks murekohaks MRSi rakendamisel on pinnavormide klassifitseerimise reeglite arvutile selgeks tegemine (d'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2013) ehk teisisõnu, kuidas panna arvutit nägema neid asju, mida näeb inimene.

2.5. Pikslipõhine lähenemine

Kuigi OBIA on tõestanud oma kasulikkust pinnavormide tuvastamisel, on siiski pikslipõhine pinnavormide piiritlemine endiselt levinud. Järjest enam tuleb juurde ja täiustatakse erinevaid tarkvaralisi tööriistu, mis võimaldavad teostada operatsioone, mida varem ei olnud võimalik teha ning seetõttu ei saa pikslipõhist pinnavormide klassifitseerimist kõrvale jätta. Broscoe *et al.* (2011) kasutasid ESRI ArcGIS tarkvaras eraldi kodeeritud moodulit ooside tuvastamiseks, mis koosnes mitmest sammust: DEM-i tasandamine müra eemaldamiseks, positiivsete pinnavormide eraldamine, millega saadi kätte ooside harjad, harjade selekteerimine kaugusel alusel ja harjadele parameetrite omastamine. Järveoja (2012) kasutas retsessioonimoreenide uurimiseks ArcGIS tarkvara ja pikslipõhist lähenemist ning LiDARi andmetel põhinevat DEMi. Positiivsete pinnavormide leidmiseks kasutas Järveoja ArcMapi hüdroloogia tööriistu, mis võimaldavad leida ainult pinnavormide harjad, kuid jalamit mitte. Sarnaselt Broscoe'le oli vaja eemaldada müra, mida tehti automaatse enamusfiltriga ja osalt käsitsi. Kuningas (2010) kasutas ArcGIS tarkvara rannamoodustiste uurimisel, kus oli vaja piiritleda luided. Jällegi oli vaja kõigepealt leida positiivsed pinnavormid, mida Kuningas tegi kõrgpääsfiltriga, mis võimaldab pinnakonarusi ning seejärel kasutas tsonaalseid- ja kujustatistikuid erinevate luidete eristamiseks.

2.6. Resolutsiooni valik

Pinnavormide piiritlemise edukus sõltub suuresti mõõtkava valikust ning piksli suurusest ja seda kõigi eelmainitud meetodite puhul. Mida väiksem on piksli suurus, seda väiksemaid objekte on võimalik eristada. Sellest saab järeldada, et mõõtkava valik sõltub vaadeldava objekti suurusest. Voorte puhul on resolutsiooni valik keeruline, kuna isegi ühe voorestiku piires on voored väga erinevas suuruses. Kasutades liiga suurt piksli suurust võivad väikesed voored jääda täpselt piiritlemata, liiga väikese piksli suuruse korral on jällegi liiga palju müra, mis segab voorte piiritlemist.

Napieralski ja Nalepa (2009) testisid 1 kuni 80-meetrise resolutsiooniga kõrgusmudeleid voorte tuvastamiseks ja said optimaalseks resolutsiooniks 10 kuni 30 meetrit. Nad analüüsisid 16 erineva suurusega voort eesmärgiga leida optimaalne piksli suurus voorte piiritlemiseks. Voorte laius oli 85-268 meetrit ja pikkus 245-1280 meetrit ning optimaalne resolutsioon vastavalt 17 ja 14 meetrit piksli küljepikkus. Nad tõid välja, et kui piksli suurus läks üle 30-40 meetri, moondusid paljude voorte kujud. Nende töös uuritud voored olid võrreldes Saadjärve voorestikuga väiksemad, mistõttu Vooremaa puhul võiks optimaalne piksli suurus olla umbes 25 meetrit. Kolga-Jaani voorestiku voored on umbes sama suured kui Napieralski ja Nalepa (2009) uurimuses. Kuna 17- ja 14-meetrist DEMi ei olnud uurimuse jaoks võimalik saada, kasutati ka Kolga-Jaani puhul 25-meetrist kõrgusmudelit.

LiDARi andmetest tehtud kõrgusmudelid on ühed täpsemad saadaolevad, seetõttu võeti kasutusele ka 50-meetrise piksli küljepikkusega kõrgusmudel. Sellegipoolest peaks võimaluse korral katsetama erinevaid piksli suuruseid, kuna voorte suuruse varieeruvus on suur. Eelmainitud töödest selgus, et väiksema kui 10-meetrise resolutsiooniga DEM ei erinenud oluliselt 10-meetrisest DEMist, mistõttu väga väikese piksli suurusega kõrgusmudelite kasutamine voorte piiritlemise suurendab lihtsalt arvutamise mahtu ja ei anna tulemustele midagi juurde.

2.7. „Küpsise vormi“ meetod voorte eraldamiseks kõrgusmudelilt

Smith *et al.* (2009) kasutasid „küpsise vormi“ („*cookie-cutter*“) meetodit, et arvutada eelnevalt käsitsi digitud voorte mõõtmeid ja mahtu. Nad keskendusid peamiselt voorte parameetrite arvutamisele, mitte otseselt voorte piiritlemisele. Nende saavutatud tulemused on

siiski tähtsad, kuna voorte piiritlemist ongi vaja selleks, et saada teada nende dimensioone. Nii öelda „küpsise vormi“ meetodi põhimõte on selles, et voored lõigati DEM-ilt välja eelnevalt digitud vormidega. Seejärel täideti järelejäänud augud tasapinnaga ja lahutati esialgne kõrgusmodel täidetud aukudega kõrgusmodelist. Tulemuseks saadi DEM, mis sisaldab ainult voori, millega saab teha erinevaid mõõtmisi.

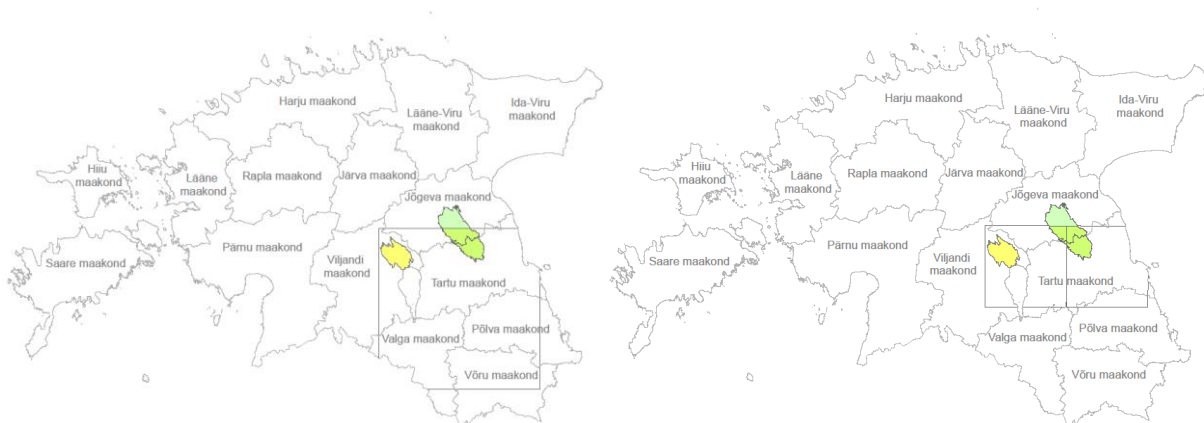
Hillier ja Smith (2012) testisid seda meetodit ning panid idealiseeritud ja eelnevalt mõõdetud voored kõrgusmodelile, tekitades kunstliku DEMi. Seejärel kasutasid „küpsise vormi“ ning võrdlesid, kas saadud voorte parameetrid langevad kokku. Meetodi tehnilisi probleeme ja täpsustusi ei hakata siin arutama, kuid meetod on sobiv kasutamiseks ka teiste pinnavormide mahu ja mõõtmete arvutamisel ning ka käesolevas töös piiritletud voorte parameetrite leidmisel.

3. Voorte piiritlemise väljatöötamise protsess

3.1. Andmed

Voorte piiritlemiseks kasutati antud töös aerolaserskaneerimise (ingl k LiDAR – *Light Detection And Ranging*) andmetest tehtud 50- ja 25-meetrise lahutusega kõrgusmudeleid ja 1:10 000 mullakaarti. 50-meetrine kõrgusmudel vastab põhikaardisüsteemi kaardilehele 54. Sinna jääb Saadjärve voorestiku lõunaosa, Kolga-Jaani voorestik ja mõned väiksemad voorestikud, mis antud uurimust silmas pidades sobivad proovialaks, sest esindavad voori piisava varieeruvusega. Saadjärve voorestiku lõunaosas on suurvoored piisavalt esinduslikud. Väikevoorte piiritlemiseks kasutati Kolga-Jaani voorestikku.

25-meetrised kõrgusmudelid vastavad kaardilehtedele 543 ja 544. Lehel 543 on täielikult Kolga-Jaani voorestik ja lehel 544 on Saadjärve voorestiku lõunaosa (joonis 4). Mullakaart katab kaardilehe 54 põhja osa. Selle ala sisse jäävad mõlemad vaatluse all olevad voorestikud. Andmed saadi Tartu Ülikooli geograafia osakonnale litsentseeritud andmete teegist. Kõrgusmudelid on Maa-ameti poolt LiDARi andmete põhjal toodetud. Kõrgusmudelite ja mullakaardi töötlemisel kasutati ESRI poolt loodud ArcGis Desktop 10 tarkvara.

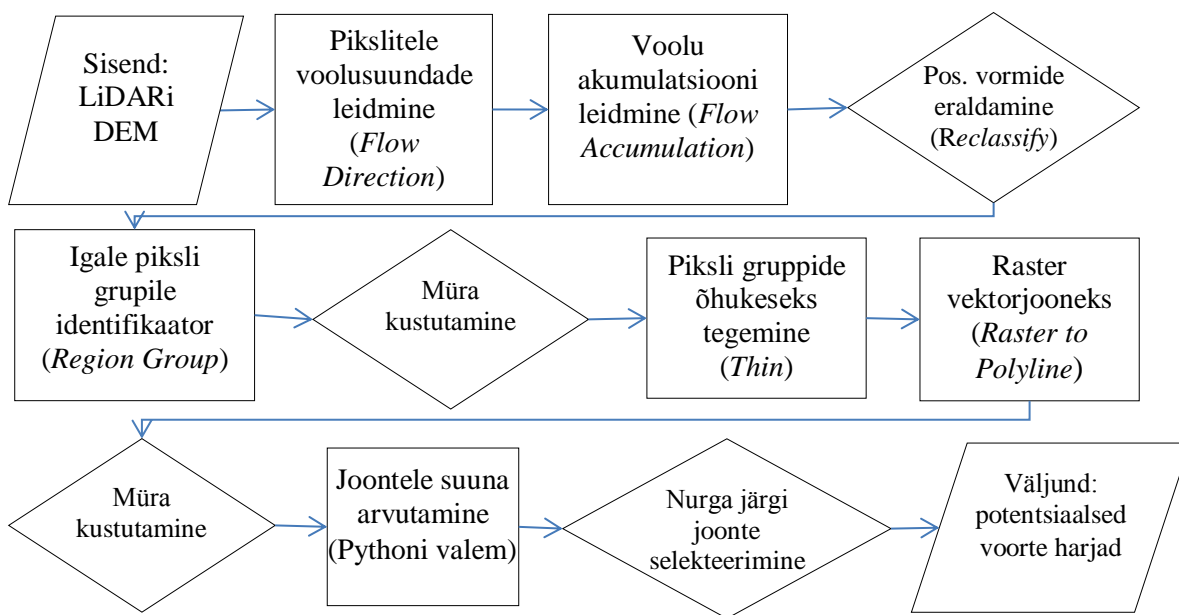


Joonis 4. Uurimisala kaardilehel 54 vasakul ning kaardilehtedel 543 ja 544 paremal. Lõuna-Vooremaa on rohelise värviga, Põhja-Vooremaa sinise värviga ja Kolga-Jaani kollase värviga (haldusjaotuse ruumiandmed Maa-ametist seisuga 05.05.2015).

3.2. Voorte piiritlemise metoodika

3.2.1. Voorte harjade leidmine

Järveoja (2012) sai tänu harjade leidmisele teada pinnavormide asukoha ning see võimaldas ka orientatsiooni järgi ebavajalikud vormid välja eraldada. Ka antud töös kasutati harjade leidmist (joonis 5) voorte asukoha teadasaamiseks.



Joonis 5. Voorte harjade leidmise skeem.

Harjade orientatsiooni ja pikkuse alusel saab eraldada potentsiaalsed ühe voorestiku piiresse jäävad voored. Voorte harjade leidmiseks leiti kõigepealt LiDARi kõrgusmodelilt positiivsed pinnavormid. Seda tehti analoogselt Järveojaga (2012) ArcMapi hüdroloogia tööriistadega *Flow Direction* ja *Flow Accumulation*. Seejärel klassifitseeriti tulemraster ümber nii, et alad, kuhu vett ei kogune, ehk harjad said väärtuseks 1 ja kõik ülejäänud said väärtuseks 0. Seejärel omistati igale pikslitegrupile identifikaator, peale mida sai pikslite gruppe selekteerida, kustutada ja liigse müra eemaldada. Tööriistaga *Thin* tehti tulemrastri grupid „õhukeseks“ ning seejärel sai rasteri konverteerida vektoriks nii, et iga rasteri objekti asemele tekkis üks vektorjoon. Seejärel kasutati igale joonele orientatsiooni arvutamiseks Pythoni valemit (valem 1), et oleks võimalik potentsiaalseid harju suuna järgi selekteerida, kuna teadupoolest on voorestikud orienteeritud teatud suundadesse sõltuvalt mandriliustiku liikumisest.

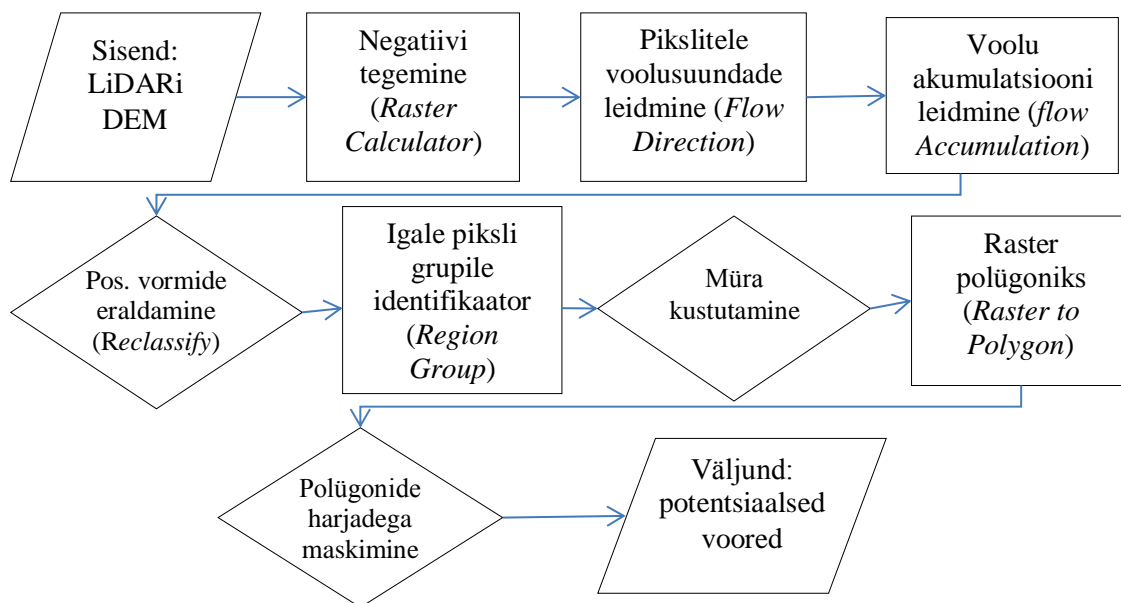
$$180 + \text{math.atan2}((! \text{Shape.lastpoint.Y} - ! \text{Shape.firstpoint.Y}), (! \text{Shape.lastpoint.X} - ! \text{Shape.firstpoint.X})) * (180 / \text{math.pi}) \quad (1)$$

3.2.2. Voorte kuju leidmine negatiivis DEMiga

Negatiivi kasutamine võimaldab hüdroloogia tööriistadega eraldada nõod ja madalad alad, ehk siis alad, mis kindlasti ei ole voored ja ülejäänud alasid saab kasutada edaspidises töötlusel. Selleks kasutati tööriista *Raster Calculator*, kuhu sisestati valem 2 ja mille tagajärjel said madalatest aladest kõrged ja vastupidi.

$$\text{negatiiv} = (([\text{raster}] - \langle \text{maximum} \rangle) * -1) + \langle \text{minimum} \rangle \quad (2)$$

Seejärel kasutati samu hüdroloogia tööriistu ja tulemrastri ümberklassifitseerimist. Ümberklassifitseerimisel said väärtuse 1 alad kuhu vett ei voola ehk tegelikkuses voorte vahelised madalad alad, ja väärtuse 0 kõik ülejäänud alad. Seejärel omistati igale piksli pikslite grupile identifikaator, ja eemaldati liigne müra nagu eelmises punktis. Maskides neid eelmises punktis leitud harjadega, eraldati polügonid, mis harjadega ei kattu, saades nii potentsiaalsed voored. Täpne skeem on toodud joonisel 6.

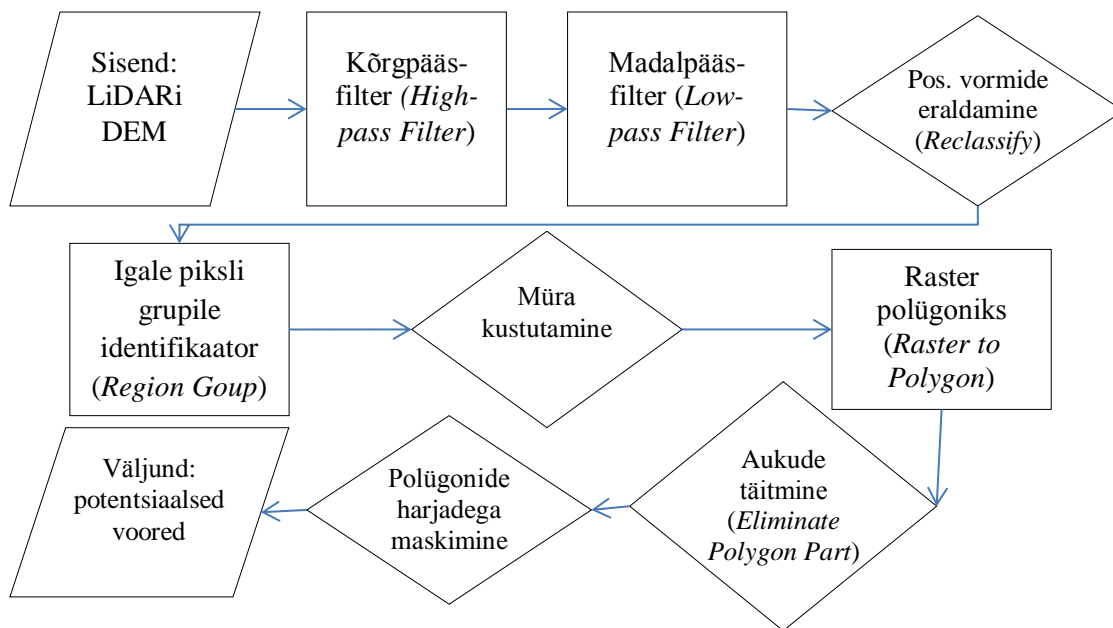


Joonis 6. Voorte piiritlemise skeem negatiivis DEMi abil.

3.2.3. Voorte kuju leidmine kõrgpääs- ja madalpääsfiltriga

Kõrgpääsfilter võimendab pinnakonarusi, ehk toob paremini esile positiivsed pinnavormid. Kõrgpääsfiltrit kasutas oma töös ka Kuningas (2010) positiivsete pinnavormide eraldamiseks. Kõrgusmodelit töödeldi 3*3 akna suurusega kõrgpääsfiltriga, ning seejärel liigse müra eemaldamiseks samasuguse aknasuurusega madalpääsfiltriga. Selline lahendus tõstis positiivsed pinnavormid esile ja eemaldas liigse müra. Seejärel klassifitseeriti tulemraster nii, et positiivsete väärtustega on tähistatud positiivsed pinnavormid ja negatiivsete väärtustega

ülejäänud alad. Järgnes jällegi piksligruppidele identifikaatori andmine ja nende töötlemine nagu eelmistes punktides (joonis 7).

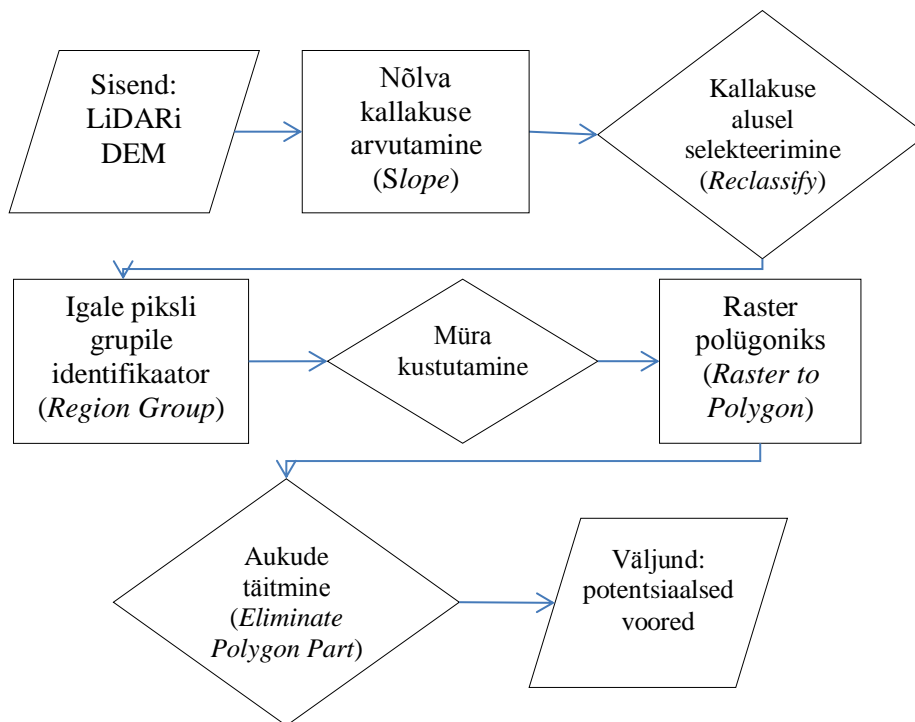


Joonis 7. Voorte piiritlemise skeem kõrg- ja madalpääs filtritega.

3.2.4. Voorte kuju leidmine nõlva kallakuse abil

Nõlva kallakuse kasulikkust voorte piiritlemisel näitasid Saha ja Munro-Stasiuk (2009) objekt-orienteeritud lähenemisel. Nõlva kallakuse kaardilt saab ebasobiva kallakusega ja tasased alad välja jätta. Kuna voored on positiivsed vormid, mille nõlvad igas ilmakaares langevad, saab nad selle järgi eraldada. Positiivsed vormid saab negatiivsetest eraldada värvigradiendi ülemineku järgi. Antud töös leiti nõlva kallakus ArcMapi tööriistaga *Slope*, mis arvutab iga piksli suurima kõrgusemuutuse tema 8 naaberpiksli suhtes ja omistab pikslile kraadilise väärtuse. Teades, et voorte nõlvad on suhteliselt lauged ($5-7^\circ$) (Arold, 2005), selekteeriti välja tasased alad ja järgi jäid alad nõlvakaldega üle $5-7^\circ$, mis tähistavad voorte nõlvu.

Kallakuse alusel selekteerimisel jäid välja ka voorte laed, mis suurvoortel on enamasti tasased alad, kuid voorte üldine kuju ja piirjooned tulid välja. Jällegi kasutati piksligruppidele identifikaatori omistamist, mis võimaldab väikesed pikslitegrupid ehk liigse müra kustutada ning järelejäänud polügonid maskiti harjadega (joonis 8).



Joonis 8. Voorte piiritlemise skeem nõlva kallakuse abil.

3.2.5. Voorte kuju leidmine mullakaardi abil

Täiendava meetodina võeti kasutusele mullakaart. Voorte vahel on enamasti soostunud või liigniisked alad, mis mullakaardil väljenduvad soo, madalsoo või gleistunud muldadega (Arold *et al.*, (1970), vt ptk 1.). Mullakaardiga koos saadi atribuutide tabel, kus sarnased mullad on värvikoodide järgi selekteeritud. Seda teadmist kasutades klassifitseeriti 10000 mullakaart värvikoodide abil ümber liigniisketeks ja kuivadeks aladeks. Täpne ümberklassifitseeritud tabel värvikoodide ja neile vastavate muldade šifritega on toodud lisades 1 ja 2.

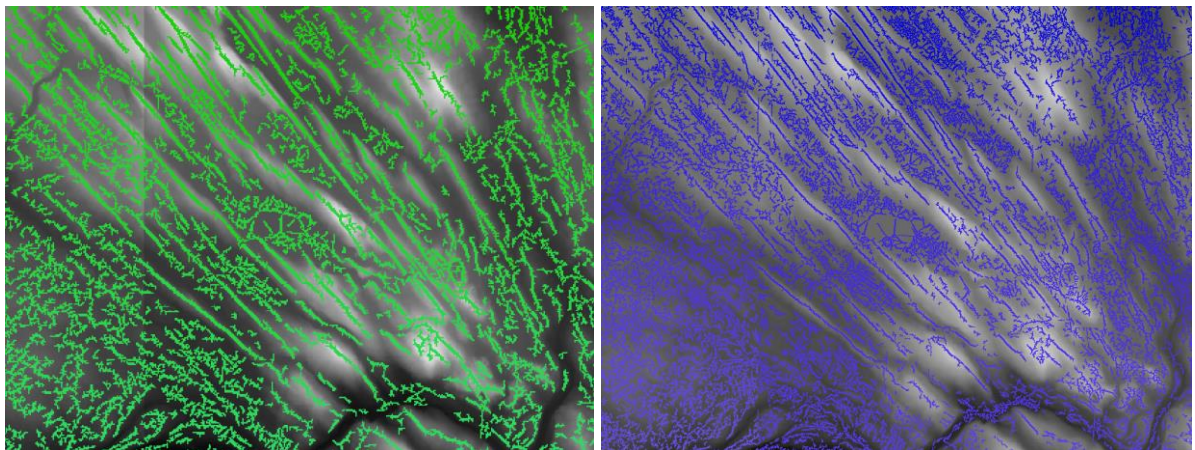
4. Tulemused ja arutelu

Töö saadud tulemusi hinnati eelkõige visuaalselt, võrreldes neid LiDARi kõrgusmodelilt paistvate voortega. Ühtegi statistilist hindamismeetodit ei kasutatud, kuna sisuliselt ei ole olemas ühtegi esinduslikku andmekogu, millega oma tulemusi võrrelda. Sellegipoolest on voored kõrgussuhete ja vormi näitava varjutusega reljeefimudelilt silma järgi selgelt äratuntavad, seda eriti Saadjärve voorte puhul. Kolga-Jaani voorestiku puhul oli visuaalne hindamine keerulisem.

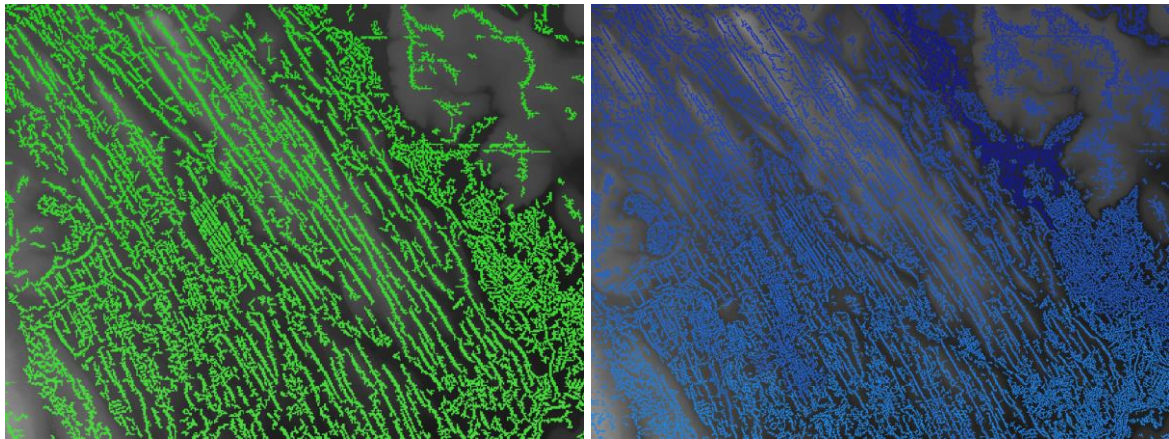
LiDARi andmete alusel on huvirühmad alles alustanud Eesti reljeefist mitmesuguste pinnavormide kaardistamist, nii et käesolev töö on üks esimesi selle valdkonna katsetusi. Kuivõrd silmaga on potentsiaalsed voored äratuntavad, siis töö üheks eesmärgiks püstitatigi „õpetada“ arvutile „nägema“ voori sama hästi, kui inimene silma abil neid tajub. Kasutati lisaks veel Rattase (2004) loodud pinnakattekaardi kihte, kus on voored välja toodud telgjoontega.

4.1. Harjade eraldamine

Harjade eraldamisel kasutati 50- ja 25-meetrise resolutsiooniga kõrgusmodelit. Pärast hüdroloogia tööriistade kasutamist ja voolu kogunemisalade ümberklassifitseerimist saadud tulemustelt (joonised 9 ja 10) on hästi näha pikad pikslite grupid, mis langevad kokku voorte harjadega.



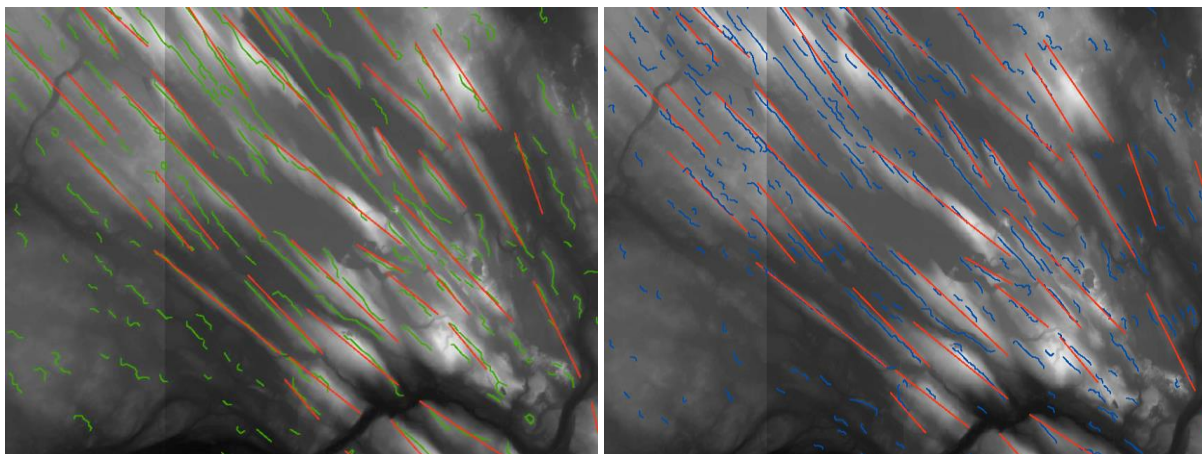
Joonis 9. Vooremaa ümberklassifitseeritud DEMi piksligruppide kattumine voorte harjadega. Eemaldatud on alla 10 pikslist koosnevad grupid. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, taustaks 25-meetrine DEM.



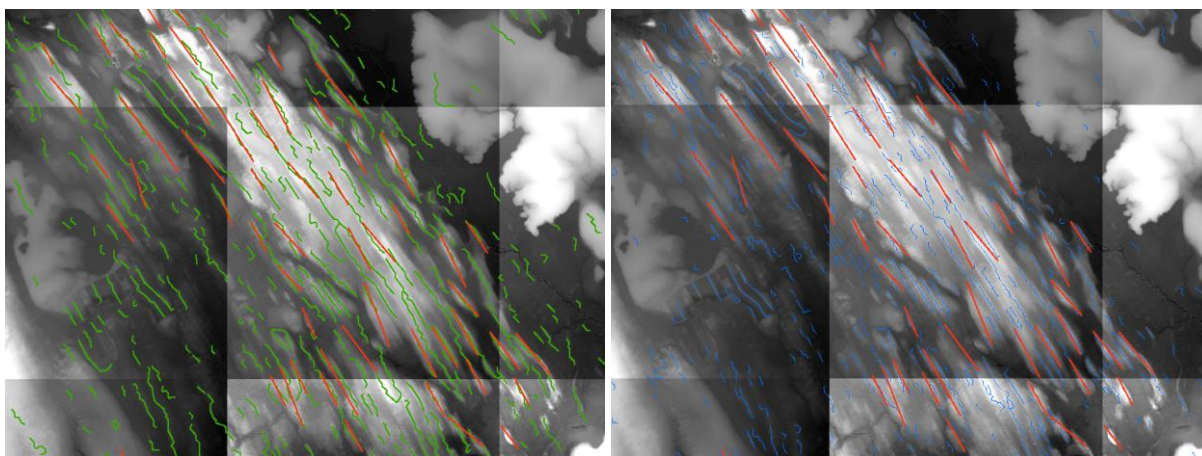
Joonis 10. Kolga-Jaani ümberklassifitseeritud DEMi piksligruppide kattumine voorte harjadega. Eemaldatud on alla 10 pikslit koosnevad grupid. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, taustaks 25-meetrine DEM.

Tööriistaga *Region Group* eraldati väiksemad pikslite grupid, mis tekitavad liigset müra. Visuaalsel hindamisel leiti, et nii Saadjärve kui ka Kolga-Jaani voorestikus annab parima tulemuse alla 50 pikslit koosnevate gruppide eemaldamine. Üle selle hakkavad kaduma ka voorte harju märkivad pikslite grupid. Seda nii 50- kui ka 25-meetrise DEMi puhul.

Tööriista *Thin* maksimaalseks paksuseks vaikeväärtuse asemel andis kõige paremad tulemused väärtus 200, seda mõlema resolutsiooniga DEMi puhul. Pärast rastri vektoriks tegemist tekkis juurde lisamüra, mistõttu eemaldati alla 300 meetri pikad vektorjooned. Järelejäänud vektorjooned selekteeriti orientatsiooni järgi (joonised 11 ja 12), mis Vooremaa puhul jäid vahemikku 106° - 158° ja Kolga-Jaani voorestikul vahemikku 93° - 147° . 50-meetrise DEMi puhul on vektorjooned enamasti pikemad kui voorte harjad tegelikult. 25-meetrise DEMi puhul jäid need jällegi liiga lühikesed ja katkendlikud. Seda ilmselt seetõttu, et siis tulevad esile väiksemad depressioonid voorte lael, mis tekitavad katkestusi harjajoontes.



Joonis 11. Vooremaa lõplikult selekteeritud voorte harjad. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 25-meetrine DEM.



Joonis 12. Kolga-Jaani voorestiku lõplikult selekteeritud voorte harjad. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 10-meetrine DEM.

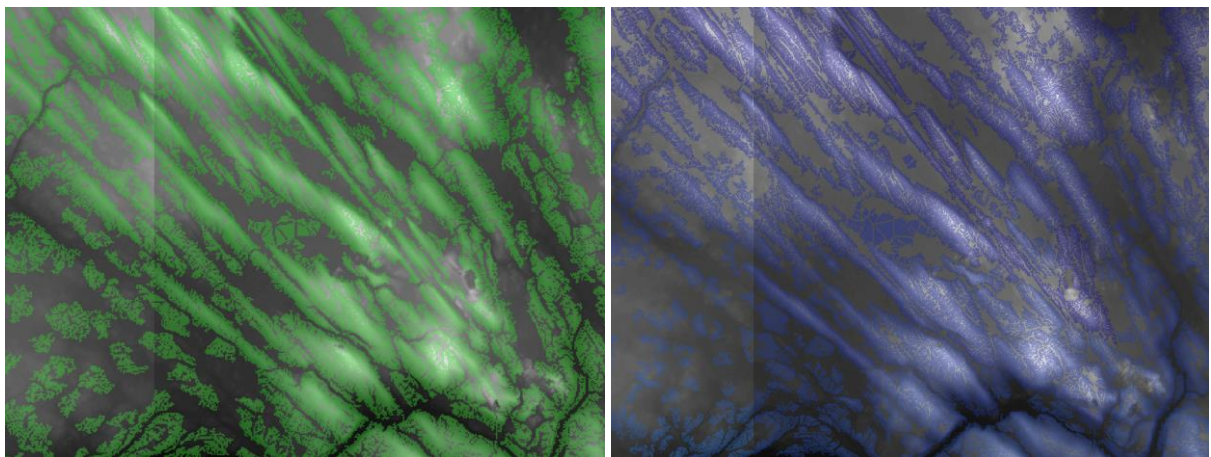
Visuaalse hindamise alusel kattuvad antud meetodiga saadud harjad voorte ja Rattase (2004) telgjoontega hästi, kuigi väga palju on ka müra, mida ei suudetud eemaldada. Harjade eraldamisel on kõige suuremaks kitsaskohaks nende pikkuse järgi väljaselekteerimine. Esiteks sellepärast, et voored on juba ühe voorestiku siseselt väga erineva pikkusega ja seetõttu ei saa mitmele voorestikule sobivat ühtset pikkust välja pakkuda. Liiga lühikeste harjajoonte allesjätmine tekitaks liigset müra ja suurendab hiljem suundade arvutamisel arvutusmahtu.

Üllatavalt on 50-meetriselt DEMilt leitud harjade kattuvus tegelike voortega parem kui 25-meetrisel. Väiksema resolutsiooni korral on harju märkivad jooned väga tükeldatud, mis ilmselt tuleneb depressioonidest voorte lael ja mille tõttu jooned katkevad. Seetõttu peab väiksema resolutsiooni korral arvestama lühemate joonte alles jätmisega, millega kaasneb ka rohkem müra. Selle vältimiseks võiks olla lahenduseks madalpääsfiltri kasutamine, mis silub

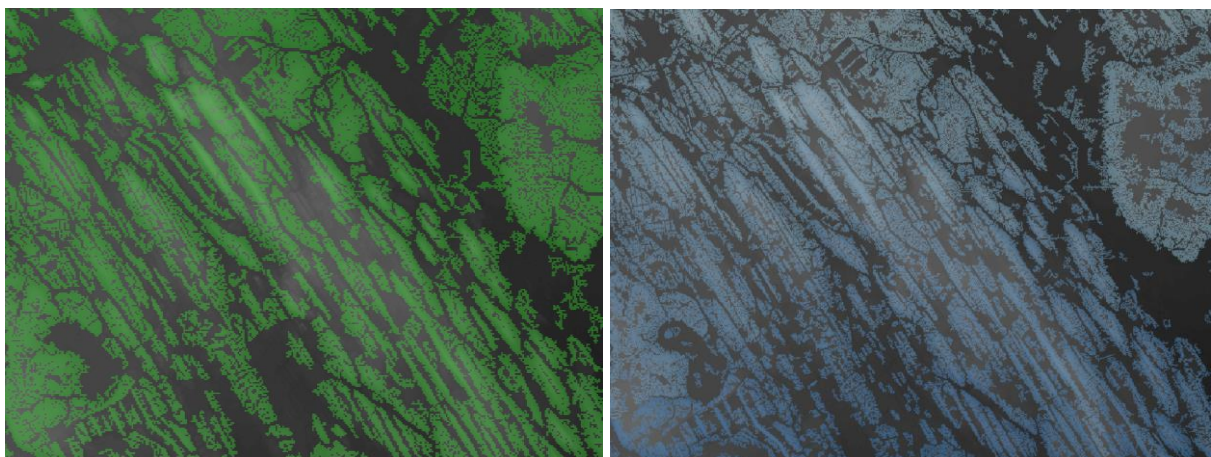
konarusi, kuid mida antud uurimuses ei tehtud. Harjade valimine suuna järgi võiks olla üks etapp, mida rohkem automatiseerida, järgmistes töödes võiks välja pakkuda lahendusi, kuidas automaatselt eraldada ühes suunas harjade grupid.

4.2. Voorte kuju leidmine negatiivse DEMiga

Voorte kuju leidmisel negatiivse DEMiga oli lähenemine, kuni väiksemate piksligruppide eraldamiseni sama, mis harjade leidmisel. 110 pikslist väiksemate gruppide kustutamine andis Vooremaa 50- ja 25-meetrise DEMi puhul kõige parema tulemuse (joonis 13). Kolga-Jaani voorestiku puhul oli selleks numbriks 30 (joonis 14).

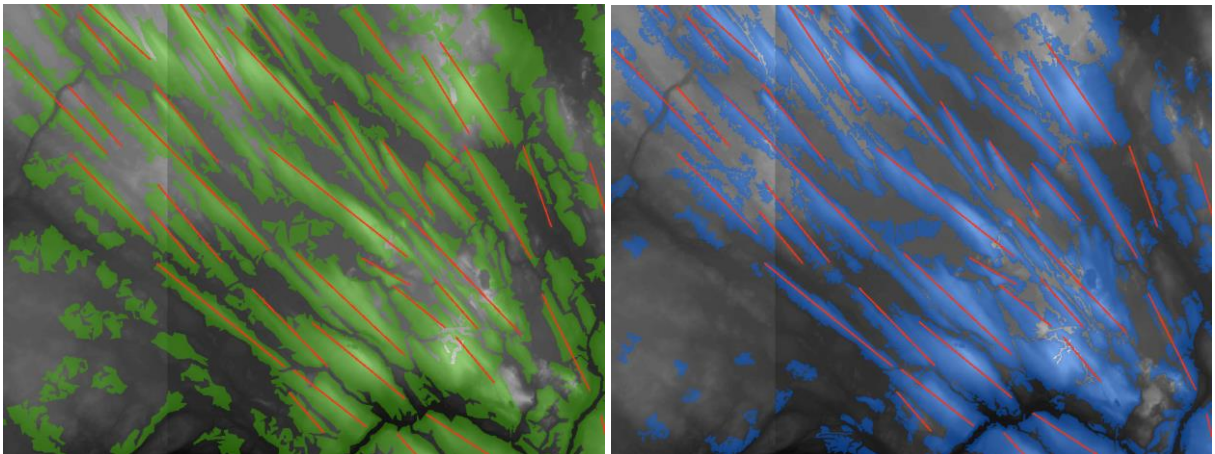


Joonis 13. Vooremaa ümberklassifitseeritud DEMi piksligruppide kattumine voortega. Eemaldatud on alla 110 pikslist koosnevad grupid. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, taustaks 25-meetrine DEM.



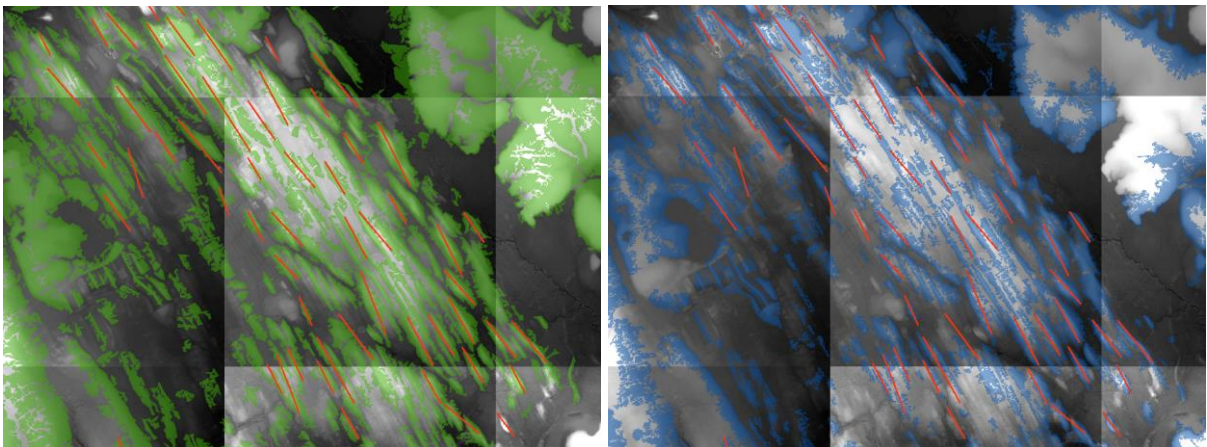
Joonis 14. Kolga-Jaani voorestiku ümberklassifitseeritud DEMi piksligruppide kattumine voortega. Eemaldatud on alla 30 pikslist koosnevad grupid. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, taustaks 25-meetrine DEM.

Tulemus, mis saadi pärast rastri vektoriks tegemist ja polügonide eraldamist, mis ei kattu eelnevalt leitud harjadega, on Vooremaa puhul näha joonisel 15. 50-meetrine DEM maskiti 50-meetriselt DEMil saadud harjadega ja 25-meetrine DEM maskiti 25-meetriselt DEMilt saadud harjadega. Väiksemad kui 500 000m² augud polügonides eemaldati tööriistaga *Eliminate Polygon Part*. Joonistelt on näha, kuidas voori märkivad polügonid on suuremad kui voored tegelikult ja osad polügonid on omavahel ühenduses.



Joonis 15. Vooremaa polügonid, mis kattuvad harjadega. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 25-meetrine DEM.

Kolga-Jaani voorestiku puhul on sama tulemus joonisel 16. Seekord eemaldati vaid 100 000 m² suurused augud, vastasel juhul oleksid polügonid läinud liiga suureks ja kaotanud voorte kuju. Seda seetõttu, et pikslite grupid olid üksteisega tihedalt seotud ja moodustasid suuri tervikuid. Polügonid on voortest tunduvalt suuremad ja üksteisega ühenduses nagu ka Vooremaa puhul.



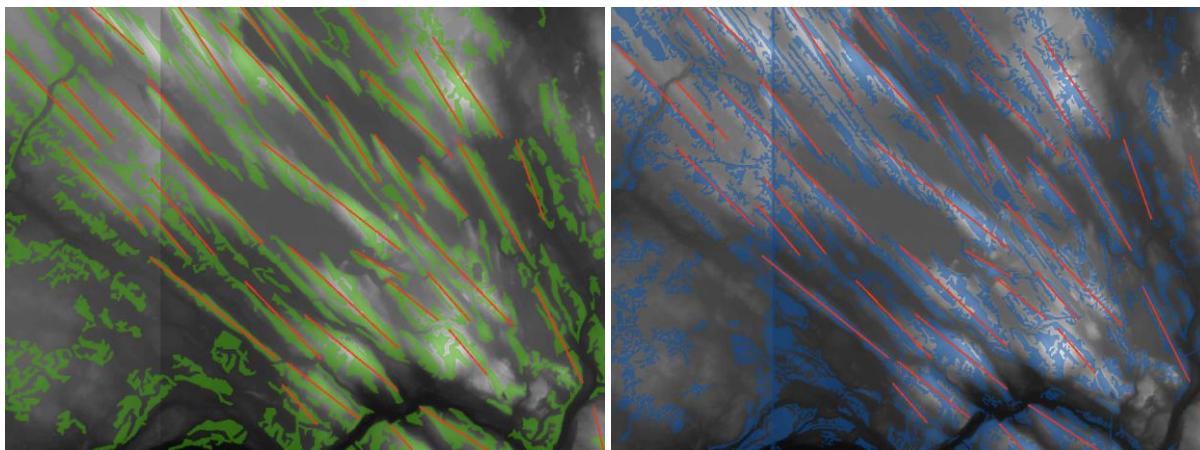
Joonis 16. Kolga-Jaani voorestiku polügonid, mis kattuvad harjadega. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 10-meetrine DEM.

Meetod töötas Vooremaal mõlema ja Kolga-Jaani voorestiku 50-meetrise DEMi puhul suhtelisest hästi. Polügonid katavad enamikke voori täielikult ja seda näitavad ka Rattase (2004) telgjooned, mis kattuvad leitud polügonidega. Kujult sarnanesid polügonid Rõugu (1974) erinevate voorte kujudega (vt joonis 1 ptk 1). Siiski on osad polügonid omavahel tugevalt liitunud ja ka liiga suured, võttes enda alla mitte ainult voored, vaid natuke suurema ala. See tuleb negatiivis kõrgusmudeli voolu akumulatsiooni rastri ümberklassifitseerimisest. Kohad, kust vett ümbritsevatele aladele ei voola, on siiski suhteliselt kitsad ja seetõttu jäävad nende väljaeraldamisel alles liialt suured alad. Kolga-Jaani 25-meetrisel kõrgusmudelil on probleemiks veel polügonide väga suur mosaiiksus ja selle tõttu osade voori märkivate polügonide puudumine, mis kadusid liigse müra eemaldamisel. Vooremaal sattusid polügonid osaliselt ka järvede keskele (nt Saadjärv), mis tuleneb LiDARi võimest eristada väikseid konarusi ja seega ka veepinnal olevaid ebatasasusi. Uurimuse selles etapis kaaluti kujustatistikute kasutamist, mida kasutas Kuningas (2010) luidete uurimiseks, et eraldada kuju järgi voored muust mürast, kuid polügonide liigse mosaiiksuse ja sopistuste tõttu ei nähtud sellel mõtet.

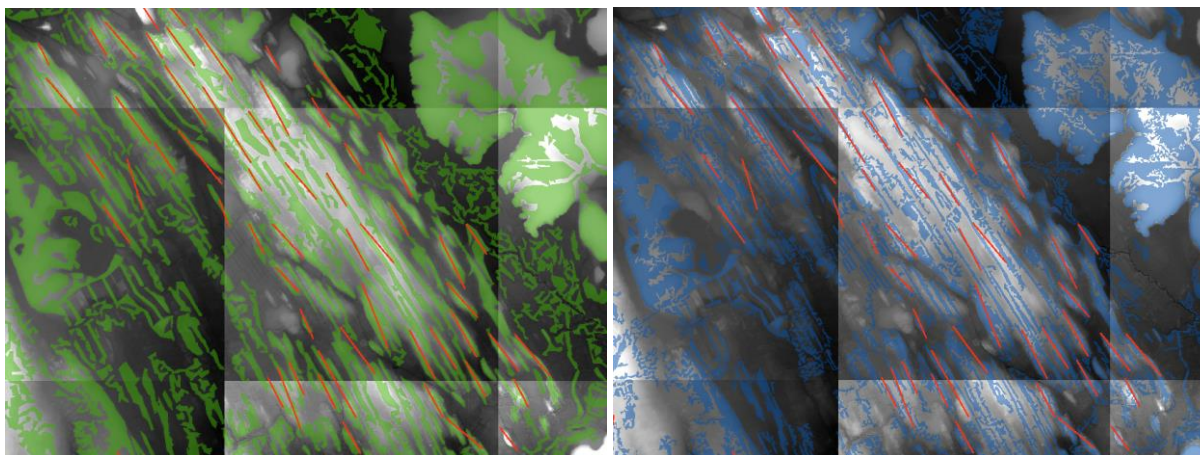
4.3. Voorte kuju leidmine kõrgpääs- ja madalpääsfiltritega

Pärast kõrgusmudeli kõrg- ja madalpääsfiltriga töötlemist kasutati samu hüdroloogia tööriistu, mis eelmises punktis. Positiivsete pinnavormide väljaklassifitseerimise järel eraldati 50-meetrise kõrgusmudeli puhul Vooremaal pikslite grupid, mis koosnesid vähem kui 70st pikslist. 25-meetrisel DEMil oli see number 110.

Kolga-Jaani voorestiku puhul andis 50-meetrise kõrgusmudeli korral parima tulemuse alla 40 piksli koosnevate gruppide kustutamine ja 25-meetrise DEMil alla 50 piksli koosnevate gruppide kustutamine. Pärast rastri vektoriks konverteerimist täideti polügonide augud ja saadud tulemus on näha joonistel 17 ja 18. Võrreldes eelmise punktiga, on voori märkivad polügonid tegelikest voortest tunduvalt väiksemad ja katavad ainult kõrgemaid alasid ning osad polügonid on üksteisega liitunud kohtades, kus voored tegelikult ei ole liitunud.



Joonis 17. Vooremaa kaetuna voori märkivate polügonidega. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 25-meetrine DEM.

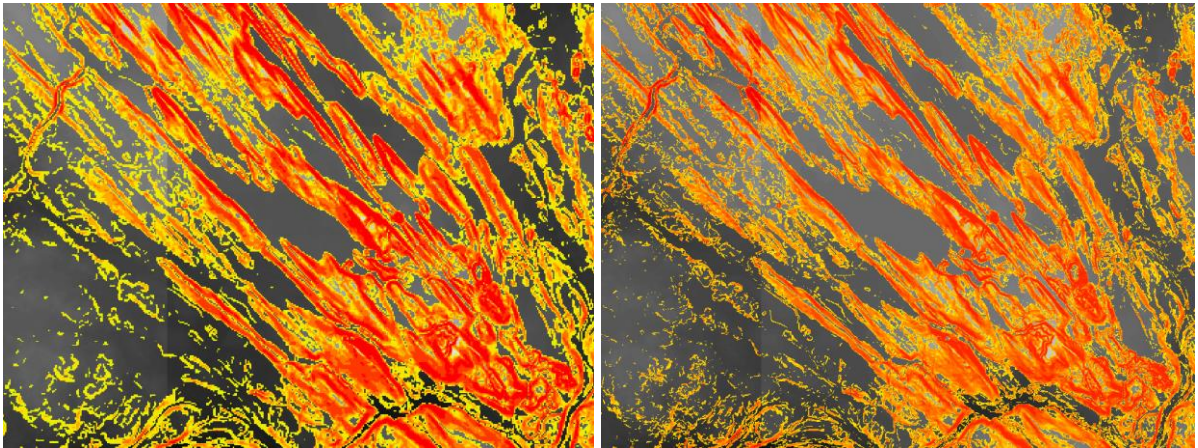


Joonis 18. Kolga-Jaani voorestik kaetuna voori märkivate polügonidega. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 10-meetrine DEM.

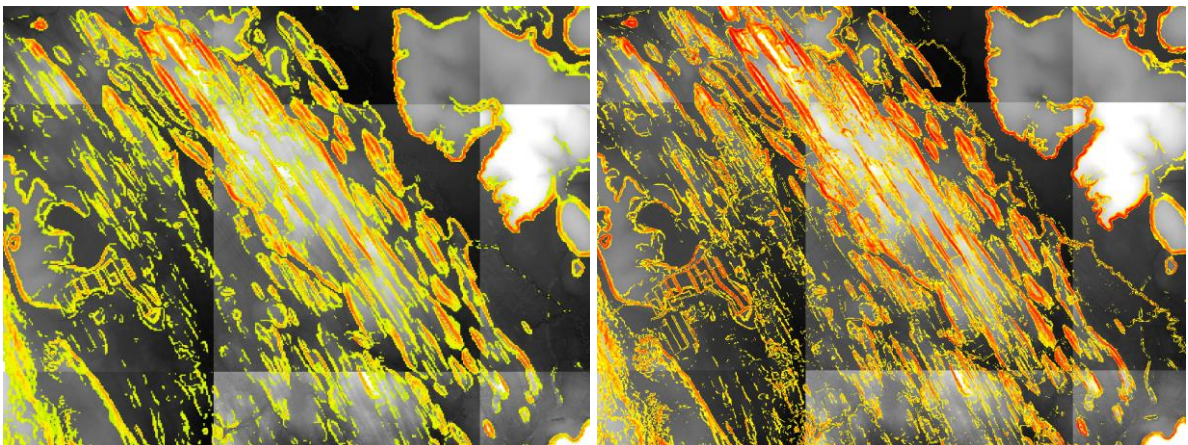
Eelmise meetodiga võrreldes on polügonid üksteisest paremini eraldatud. Siiski on nad osades kohtades liiga väikesed ja katavad ümbritsevast alast vaid kõige kõrgemaid kohti, mistõttu suuremaid voori katavad mitu üksteisest eraldatud polügoni. Meetod sobib pigem väikevoorte eraldamiseks suurema pikslisuurusega kõrgusmudelilt. 25-meetrise DEMi korral on polügonid jällegi väga mosaiiksed. Meetodit võiks kasutada ka harjajoonte leidmiseks, tehes pikslite grupid tööriistaga *Thin* kitsamaks. Kõrgpääsfiltri pinnakonaruste võimendamise tagajärjel tekib juurde lisamüra, mida eelmise meetodi puhul ei tekkinud.

4.4. Voorte kuju leidmine nõlva kallakuse abil

Nõlva kallakuse abil voorte kuju leidmiseks saadi parim tulemus nõlva kallakuse ümberklassifitseerimisel nii, et kallakused üle 7° said väärtuseks 1, mis tähistab voori, ja ülejäänud alad väärtuseks 0. Selline valik piiritles kõige paremini voori nii 50-meetrise kui ka 25-meetrise DEMi puhul Vooremaa voorestikus (joonis 19). Kuna Kolga-Jaani voorestiku voored on laugemad, siis valiti voori piiritlema üle 5° kallakusega alad (joonis 20). Seda nii 25-meetrise kui ka 50-meetrise DEMi korral.



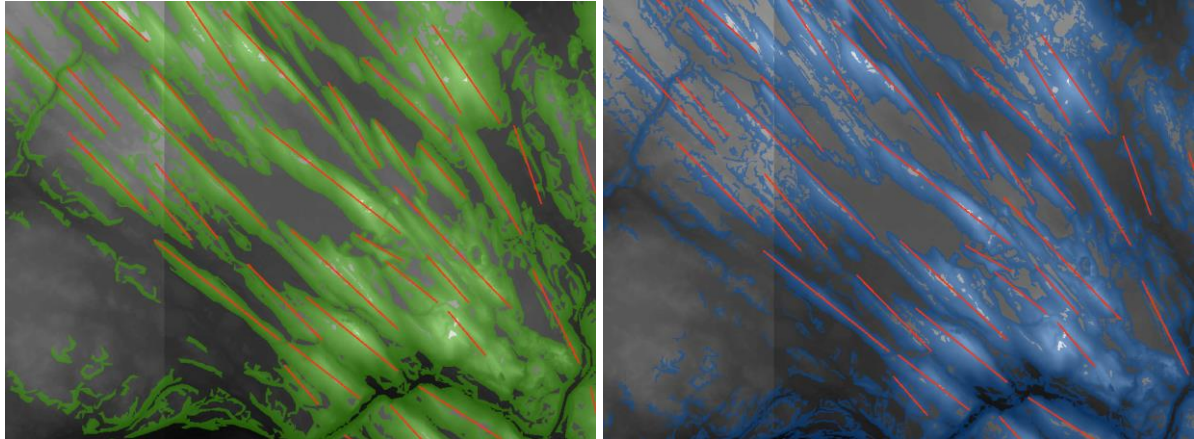
Joonis 19. Nõlva kallakused, mis näitavad voorte asukohta Vooremaal. Vasakul 50-meetrine DEM, paremal 25-meetrine DEM. Taustaks 25-meetrine DEM.



Joonis 20. Nõlva kallakused, mis näitavad voorte asukohta Kolga-Jaani Voorestikus. Vasakul 50-meetrine DEM, paremal 25-meetrine DEM. Taustaks 10-meetrine DEM.

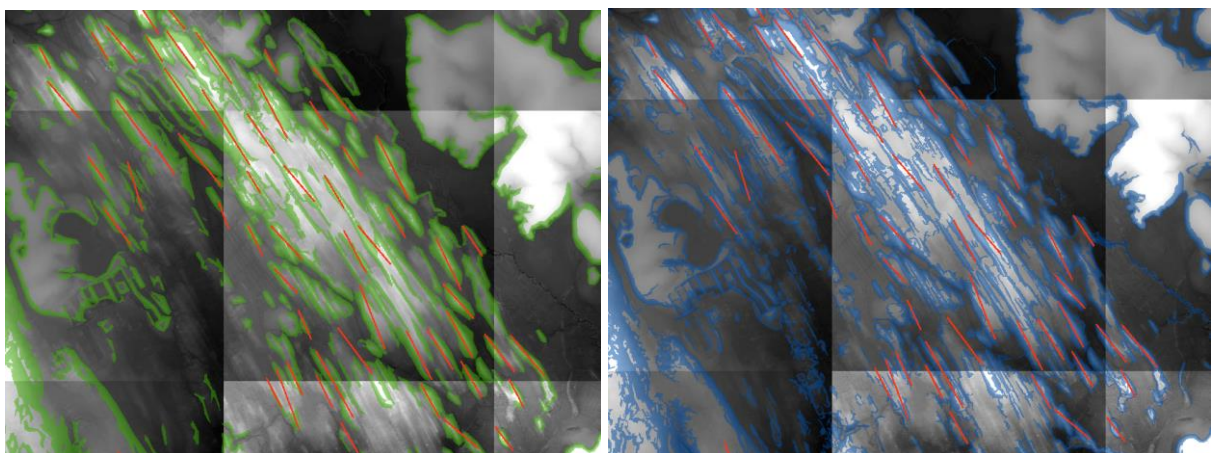
Enne Vooremaa nõlva kallakuse rastri vektoriks tegemist eemaldati 25- ja 50-meetrisel DEMil liigse müra näol pikslite grupid, mis olid alla 50 piksli suurus. Tulemvektoril (joonis 21) täideti polügonides olevad 10 000 m² augud tööriistaga *Eliminate Polygon Part*. Kuna pikslid olid üksteisega tihedalt ühenduses, siis suuremate aukude täitmisel läksid polügonid

liiga suureks ja voori ei saanud enam üksteisest eristada. Harjade järgi polügonide selekteerimine ei andnud rahuldavaid tulemusi, sest nõlva kallakus katab voorte nõlvu, mitte lage ja mõnede väiksemate voorte puhul harjajooned ei kattunud saadud nõlva kallakuse polügonidega.



Joonis 21. Nõlva kallakuse polügonid Vooremaal. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 25-meetrine DEM.

Kolga-Jaani voorestiku puhul andis 25-meetrisel DEMi puhul samuti parima tulemuse alla 50 pikslist koosnevate gruppide eemaldamine, kuna nii sai lahti ka väiksemaid kraavitusi tähistavatest nõlva kalletest. 50-meetrisel DEMil oli kõige sobivam eemaldada alla 30 pikslist koosnevad grupid, kuna suuremate gruppide eemaldamine kaotas ära ka osad väiksemad voored. Tulemvektoril (joonis 22) täideti polügonides olevad 10 000 m² augud tööriistaga *Eliminate polygon part*. Sarnaselt Vooremaale ühinesid polügonid liiga suureks suuremate aukude täitmisel. Ka siin ei selekteeritud polügone harjajoontega kattumise alusel välja.

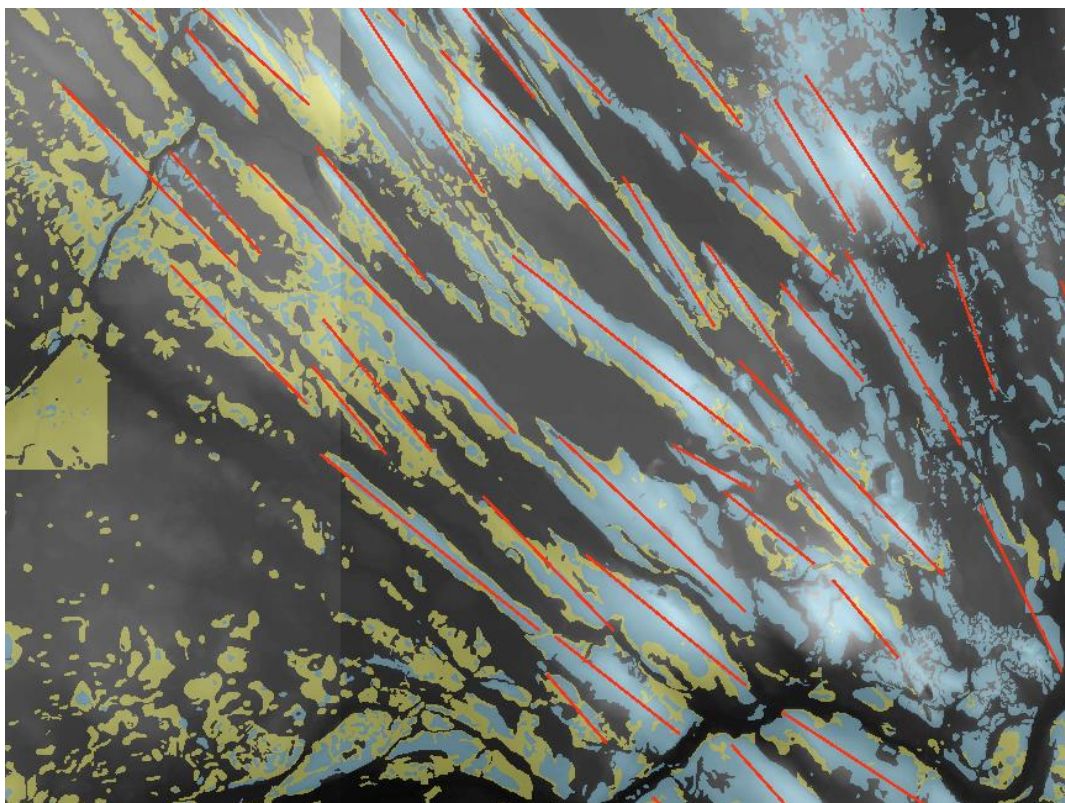


Joonis 22. Nõlva kallakuse polügonid Kolga-Jaani voorestikus. Rohelisega 50-meetrine DEM, sinisega 25-meetrine DEM, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 10-meetrine DEM.

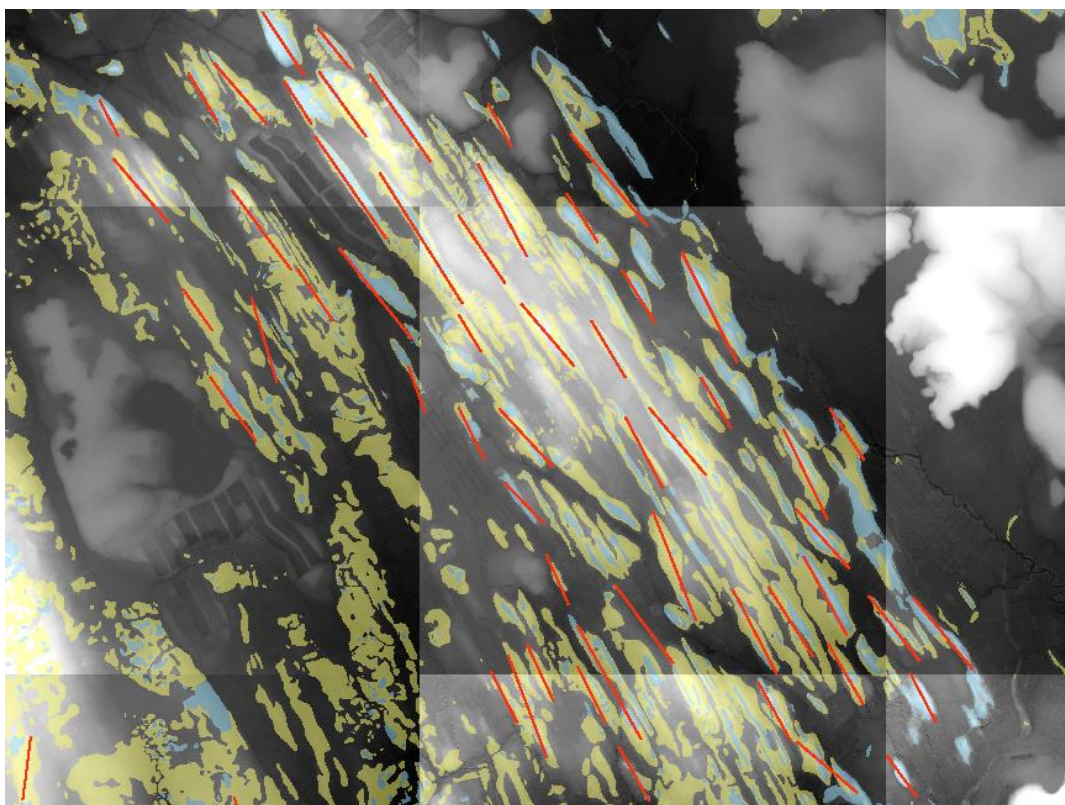
Nõlva kallakusega voorte piiritlemisel tekkis kõige vähem müra, voored tulevad pildi pealt päris hästi välja ning sarnanevad Rõugu (1974) klassifitseeringuga. Probleemiks on aga polügonide väga suur ühendatus omavahel, seda eriti Vooremaa puhul ning seetõttu ei saa voorte laele tekkivaid suuri auke polügonide sees täita, sest siis kaovad ära voorte piirjooned polügonide vahel. Seetõttu ei saa ka üksikuid voori nende mõõtmiseks polügonide järgi üksteisest eraldada. Osad väga laugete nõlvade voored jäid Kolga-Jaani puhul piiritlemata, kuid laugema nõlva kallakuse kasutuselevõtt tekitaks väga palju lisa müra.

4.5. Voorte kuju leidmine mullakaardi abil

Mullakaardi abil voorte leidmisel kasutati värvikode, mis klassifitseeriti visuaalse vaatluse teel ümber nii, et voored tuleksid kõige paremini välja. Kõige raskem Vooremaa puhul oli paigutada värvi koodiga 12 (joonis 23), mis tähistab gleistunud rähkmuldi, gleistunud leostunud muldi, gleistunud koreserikkaid leostunud ja rähkmuldi ning gleistunud maetud muldi, kuna osade voorte puhul muutusid voored liiga suureks ja osade puhul liiga väikeseks. Kolga-Jaani voorestiku puhul tuli värv koodiga 12 kindlasti kasutusele võtta, muidu oleks voored jäänud liiga väikeseks (joonis 24). Mullakaardi abil voorte piiritlemine andis kõige parema tulemuse. Siiski olid voori märkivad polügonid üksteisega ühenduses ja sellised polügonid ei sobi voorte eraldamiseks kõrgusmodelilt, kuna edasist voorte mõõdistamist ja mahu leidmist ei saaks iga voore kohta eraldi teha. Mullakaardi kasutamine tõi välja teiste meetodite olulise puudujäägi. Nimelt saab mulla kaardi abil eraldada rabad, mis on muust alast kõrgemad ja seega kvalifitseeruvad teiste meetodite puhul (k.a objekt-orienteeritud lähenemisel) positiivseteks vormideks. Näitena võib tuua Kolgi raba Kolga-Jaani voorestiku keskel ja Sortsi ning Lavasoo raba Vooremaal. Eriti tuleb sellele tähelepanu pöörata Kolga-Jaani suguste väikevoorestike puhul, kus raba pind võib olla sama kõrge kui mõnel madalamal voorel. Vooremaa puhul rabad eriti ei sega, kuna voored on nendest palju kõrgemad ja suuremad. Voorte vahel olevad järved on voortega sarnase kujuga ja nende järvede kinnikasvamisest tekkivad rabad sarnanevad väga voortele. Seda probleemi ei ole autorile teadaolevalt voorte piiritlemist käsitlevas kirjanduses varem välja toodud. Siiski tuleb mullakaarti suhtuda väga kriitiliselt, kuna seda koostavad paljud inimesed, kes ei pruugi muldi määrata täpselt ühtemoodi.



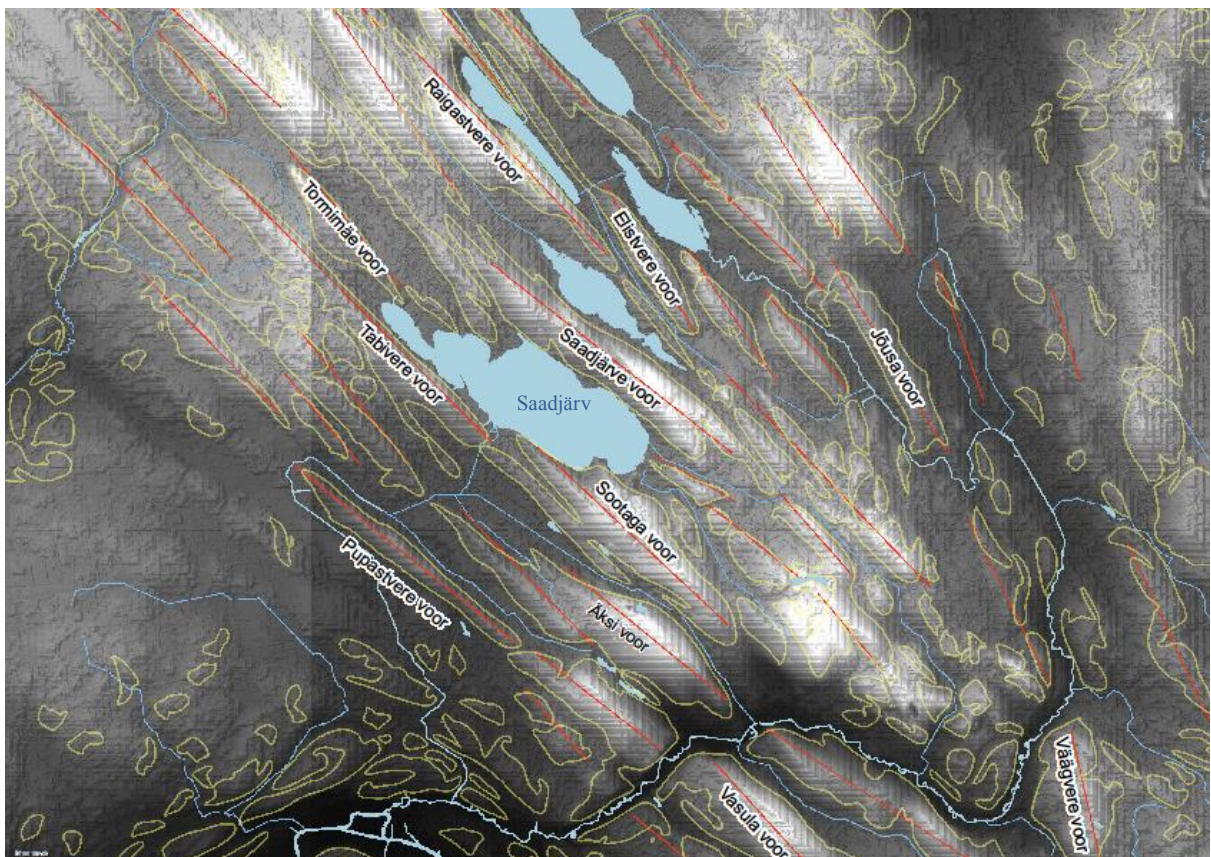
Joonis 23. Mullakaardiga saadud polügonid Vooremaa kohta. Värv number 12 on kollasega, punasega Rattase telgjooned (2004), taustal 25-meetrine DEM.



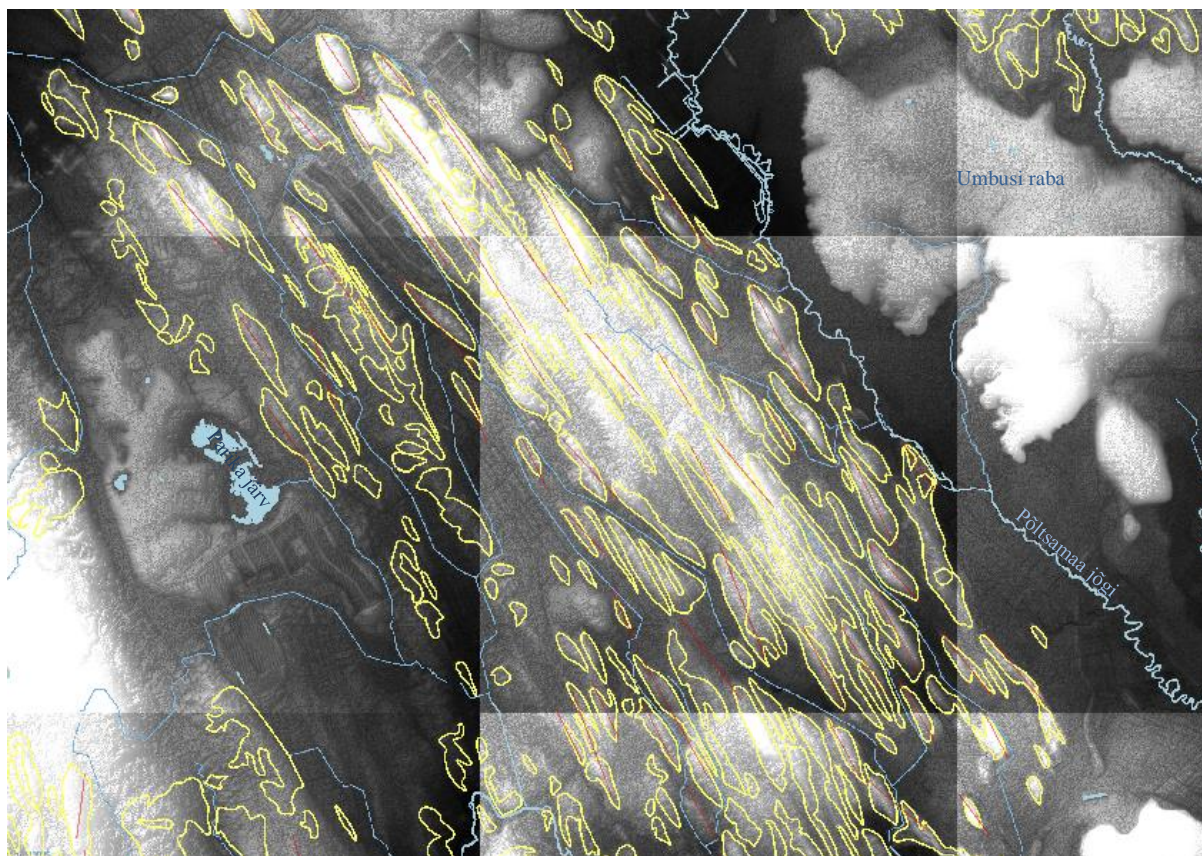
Joonis 24. Mullakaardiga saadud polügonid Kolga-Jaani voorestiku kohta. Värv number 12 on kollasega, punasega Rattase (2004) telgjooned, taustal 25-meetrine DEM.

4.6. Kombineeritud voorte piiritlemine

Kuna eelpool kirjeldatud punktides ei suutnud ükski lahendus eraldi voori piisava täpsusega piiritleda, siis prooviti eelnevate tulemuste omavahel kombineerides saavutada parem tulemus. Kõige parem tulemus saadi kasutades negatiivi pandud 50-meetrist kõrgusmudelit, millelt eraldati voorte vahelised polügonid. Saadud tulemus maskiti mullakaardi abil leitud voorte polügonidega. Sellega suudeti liitunud polügonid üksteisest paremini eraldada. Seejärel täideti polügonides olevad augud ja kustutati väiksemad polügonid. Voorte kuju vähem nurgelisemaks tegemiseks siluti saadud tulemus tööriistaga *Smooth polygons*, pannes silumise tolerantsiks 1000 meetrit (joonised 25 ja 26).



Joonis 25. Lõplikult klassifitseeritud voored Vooremaal. Punasega Rattase (2004) teljooned, taustaks 25-meetrine DEM (Veekogude ja jõgede kiht saadud Maa-ameti WMS teenuselt).



Joonis 26. Lõplikult klassifitseeritud voored Kolga-Jaani voorestikus. Punasega Rattase (2004) telgjooned, taustaks 10-meetrine DEM (Veekogude ja jõgede kiht saadud Maa-ameti WMS teenuselt).

Võrreldes mõnde teise voorte piiritlemise tööga (Saha, 2010; Eisank *et al.* 2014; Hillier ja Smith, 2012) võib tulemust Vooremaa puhul pidada heaks. Edasine uurimustöö ning meetodite täiustamine ja lisamine on siiki vajalik, kuna esineb liiga suuri ja ka liiga väikeseid polügone, ning endiselt on mõned polügonid liitunud. Teistest paremini tulid välja kitsad ja kõrged voored nagu Pupastvere, Elistvere ja ka Tormimäe voor. Suurematel ja laugematel voortel – Saadjärve, Sootaga, Raigastvere ja Vasula voor – esineb mitmeid ebaloomulikke jätkeid. Raigastvere voor on erinevalt Rattase (2004) kaardist (lisa 2) tükeldatud kaheks – läänes asuv „saba“ osa on ülejäänud voorest eraldatud. Suhteliselt hästi on piiritletud Sootaga ja Äksi voored, mis siiski on ühenduses nendest idas olevate väiksemate voortega.

Kolga-Jaani puhul on üksikud eraldiseisvad suuremad voored suhteliselt hästi piiritletud. Teised on enamasti alapiiritletud. Kolga-Jaani puhul peaks edasistes töodes vaatluse alla võtma 25-meetrisest DEMist väiksema lahutusega kõrgusmodelid, mis võivad sooritust parandada. Parendada annab ka mulla kaardi abil voorte piiritlemist, klassifitseerides mullad ümber šifrite mitte värvide järgi.

Kokkuvõte

Eesti pinnamoodi on väga palju kujundanud mandriliustikud. Kuigi liustikke ja nendega kaasnevaid pinnavorme on väga palju uuritud, ei teata siiski kunagiste liustike mahust ja suurusest väga palju. Mandriliustikke aitab paremini mõista liustikuliste pinnavormide mahu ja suuruse arvutamine. Seda on kõige lihtsam teha tarkvaraliste vahenditega, eraldades huvipakkuvad pinnavormid muust maastikust nende mõõtmiseks.

Käesolevas töös kasutati tarkvaralisi analüütilisi vahendeid voorte eristamiseks eesmärgiga need hiljem kõrgusmodelilt eraldada erinevate mõõtmiste teostamiseks. Põhiliseks loogikaks oli positiivsete pinnavormide leidmine ja seejärel voorte välja selekteerimine. Selleks kasutati vaatlusalustes voorestikes olevate voorte piiritlemiseks voolu akumulatsiooni leidmist, kõrgusmodeli negatiivi panemist, kõrg- ja madalpääsfiltrit ja nõlva kallakust ning müra eemaldamise võtteid. Lisavahendina võeti kasutusele mullakaart, millel oli lõpliku tulemuse saavutamisel väga suur kaal. Tulemusi hinnati visuaalselt, kasutades selleks kõrgusmodelit ja Rattase (2004) doktoritöös leitud voorte telgjooni.

Töö on jaotatud neljaks osaks. Esimeses osas kirjeldatakse voori ja uurimisalasse jäävaid vaatlusaluseid Vooremaa ja Kolga-Jaani voorestikke. Teine osa käsitleb voorte tuvastamise erinevaid meetodikaid ja lähenemisi ning tutvustab teiste autorite töid selles vallas. Kolmandas osas räägitakse lähemalt käesolevas töös kasutatud andmetest ja meetodikast voorte piiritlemiseks ning tuuakse välja uuringuala kaart. Viimases osas esitatakse erinevate meetodite tulemused, võrreldakse nende häid ja halbu külgi ning pakutakse välja võimalikud seletused tekkinud probleemidele.

Ükski meetod eraldi ei olnud piisav voorte piiritlemiseks, seetõttu kombineeriti erinevate meetodite tulemusi omavahel. Vooremaa lõplikule tulemusele võib anda hinnangu hea. Kolga-Jaani voorestikus suudeti täpselt piiritleda vaid üksikud eraldiseisvad suuremad voored. Saadud lõplik tulemus ei ole piisav voorte eraldamiseks kõrgusmodelilt ning edasine töö selles vallas on vajalik.

Tänuavaldused

Tänan oma juhendajat Raivo Aunapit, kes andis vajalikke näpunäiteid ja tegi mitmeid parandusi.

Possible ways to delimit drumlins from LiDAR derived elevation model with GIS software

Risto Ülem

Summary

Estonian landscape has been very largely shaped by continental glaciers. While glaciers and glacial landforms are very largely studied, we still do not know much about the size and volume of past large ice sheets. Studies about glacial landforms gives us important knowledge about past ice sheets that formed our landscape. Measuring and calculating volumes of these landforms gives us important information about the energy, movement and volume of continental glaciers. While fieldwork is time consuming and expensive, it is easier to do this kind of measurements with software tools behind computers, separating interested landforms from surrounding landscape for measuring. Therefore is the interest of scientist who studies landforms moved from delimiting landforms with fieldwork to delimiting them behind computers.

Drumlins, because of their shape, are the simplest glacial landforms and are therefore most common landforms to delimit with computer software. However, so far scientists have not managed to offer single and complete solution to isolate them from DEMs. In this paper, it is taken under observation, how to isolate drumlins from LiDAR derived 25 and 50 meter elevation model with GIS software. The main study area is Saadjärve drumlin field, where are represented large scale drumlins. For testing the methods, Kolga-Jaani drumlin field with smaller drumlins, was chosen.

The key factor was finding positive landforms and then extracting drumlins. In order to do this hydrology toolset, negative DEM, highpass filter and slope gradient was used. In addition, soil maps was used, to extract bogs from positive landforms.

The results were compared visually with LiDAR derived elevation model. None of the methods used could delimit drumlins separately, therefore combination of methods was used for better results. The most accurately performed 50 meter DEM, delimiting bigger drumlins. Smaller drumlins were delimited poorer. Further study and improvement of methods and adding new methods is necessary.

Kasutatud kirjandus

- Arold, I. (2005). Eesti maastikud. Tartu Ülikooli Kirjastus. Tartu, 453 lk
- Arold, I., Jõgi, J., Raik, A. (1976). Maastiku profiil üle voorte ja nõgude. *Eesti Loodus*, 6: 380-387.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65: 2-16.
- Broscoe, D., Cummings, D., Russell, H. A., Sharpe, D. R. (2011). A Semi-Automated Esker Detection Method (EDM) for Improved Quantification of Glaciated Landscapes. *Geological Survey of Canada, Technical Note 2*, 1-17.
- Chorley, R. J. (1959). The shape of drumlins. *Journal of Glaciology*, 3: 339-344.
- Clark, C. D., Hughes, A. L., Greenwood, S. L., Spagnolo, M., Ng, F. S. (2009). Size and shape characteristics of drumlins, derived from a large sample, and associated scaling laws. *Quaternary Science Reviews*, 28: 677-692.
- d'Oleire-Oltmanns, S., Eisank, C., Dragut, L., Blaschke, T. (2013). An Object-Based Workflow to Extract Landforms at Multiple Scales From Two Distinct Data Types. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol 10, nr 4: 947-951.
- Definiens. (2007). Definiens Developer 7 User Guide. Definiens AG. München, Germany.
- Dragut, L., Eisank, C. (2011). Object representation at multiple scales from digital elevation models. *Geomorphology*, 129: 183-189.
- Eisank, C., Smith, M., Hillier, J. (2014). assesment of multiresolution segmentation for delimiting drumlins in digital elevation models. *Geomorphology*, 214: 452-464.
- Gronemeyer, P. (2012). The Landscape Toolbox. Object-based Classification. http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:object-based_classification [vaadatud 01. 05 2012]
- Hillier, J. K., Smith, M. J. (2012). Testing 3D landform quantification methods with synthetic drumlins in a real digital elevation model. *Geomorphology*, 153-154: 61-73.
- Järveoja, M. (2012). Võimalike retsessioonimoreenide esinemine Alutagusel. Magistritöö loodusgeograafias. Tartu Ülikool, Tartu
- Kuningas, B. (2010). Kõrgusmudeli kasutamine Holotseeni rannamoodustiste morfogeneesi uurimisel Narva-Jõesuu piirkonnas. Magistritöö geoinformaatikas ja kartograafias. Tartu Ülikool, Tartu.

- Napieralski, J. A., Nalepa, N. (2012). Optimizing Geomorphometry Using Statistical Process Control Methods. Toim: S. P. Werther, *Process Control: Problems, Techniques and Applications* (lk 111-124). New York: Nova Science Publishers.
- Napieralski, J., & Nalepa, N. (2009). The application of control charts to determine the effect of grid cell size on landform morphometry. *Computers & Geosciences*, 36: 222-230.
- Rattas, M. (2004). Subglacial environment in the formation of drumlins - The case of the Saadjärve Drumlin Field, Estonia. Doktoritöö, Tartu Ülikooli kirjastus, Tartu.
- Rõuk, A.-M. (1974). Voorte ja voorelaadsete pinnavormide morfoloogiline vaheldusrikkus Saadjärve voorestikus. EGS Aastaraamat 1973, Tallinn, 5-35.
- Rõuk, A.-M. (1976). Vooremaa kujunemise põhijooni. Eesti Loodus, 6: 367-374.
- Rõuk, A.-M. (1990). Kolga-Jaani voorestik. Eesti Loodus, 11: 730-734.
- Saha, K. (2010). Object-oriented classification of drumlins from digital elevation models. Kent State University: doktori kraadi väitekirj.
- Saha, K., Munro-Stasiuk, M. (2009). Automated extraction of drumlins from digital elevation models through object-oriented classification. *ASPRS 2009 Annual Conference*.
- Smith, M. J., Wise, S. M. (2007). Problems of bias in mapping linear landforms from satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9: 65-78.
- Smith, M. J., Rose, J., Booth, S. (2006). Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: An evaluation of the principle data sources and an assessment of their quality. *Geomorphology*, 76: 148-165.
- Smith, M. J., Rose, J., Gousie, M. B. (2009). The Cookie Cutter: A method for obtaining a quantitative 3D description of glacial bedforms. *Geomorphology*, 108: 209-218.

Lisad

Lisa 1. Voori märkivad mullad värvikoodide ja neile vastavate muldade šifritega.

värvikood	1	2	4	5	6	8	12	18
Š i f f e r	Lk	K	K-	L-	LP	L(k)g	Kg	E2
	Lk(1)	K()	K(1)	L(1)	LP(1)	L(k)g(1)	Kg(1)	E2o
	Lk(1;2)	K(1)	K(1;2)	L(1;2)	LP(1;2)	L(k)gn	Kg(2)	E3
	Lk(1;3)	K(1;2)	K(1;3)	L(1;3)	LP(1;3)	L(k)gn	Kg(4)	E2k
	Lk(2)	K(2)	K(2)	L(1;4)	LP(2)	Lg	Kgal	E3o
	Lk(2;1)	K(2;1)	K(2;1)	L(2)	LP(2;1)	Lgn	Kgd	E2(g)
	Lk(2;3)	K(2;3)	K(2;3)	L(2;1)	LP(2;3)	Lgn(1)	Kog	E3k
	Lk(3)	K(2;3)	K(3)	L(2;3)	LP(2;4)	Lkg	Koga	E2;3o
	Lk(3;1)	K(3)	K(3):D(3)	L(2;4)	LP(3)	Lkg(1)	Kogal	E2;3k
	Lk(3;2)	K(3;1)	K(3;2)	L(3)	LP(3)Lk(3)	Lkg(2)	Korg	E3;2
	Lk(3;4)	K(3;2)	K(3;4)	L(3;1)	LP(3;2)	Lkg(2)	Krg	E2k(4)
	Lk(4)	K(3;4)	K(4)	L(3;2)	LP(3;4)	Lkge	Krg(2)	E2;3
	Lk(4)LP(4)	K(4)	K(4;3)	L(3;4)	LP(4)	Lkgn	Tzg	E3;2k
	Lk(4;1)	K(g)	Kd	L(4)	LP(4;3)	Lsg	Tzg*	E2(3)
	Lk(4;3)	Ke	Ke	L(4;1)	LP(g)			E2k(3)
	Lk(g)	Ke(1)	Ke(2)	L(k)	LP(g)1			
	Lk(g)(1)	Ke(2)	Ke(3)	L(k)(1)	LP(g)d			
	Lke	Ke(3)	Ko	L(k)(1;2)	LP(g)K(g)			
	Lke(2)	Kje	Ko(1)	L(k)(1;2)Lk	LPd			
	Lke(3)	Kr	Ko(1;2)	L(k)(1;3)	LPd(1)			
	Lke(g)	Kr(1)	Ko(2)	L(k)(1;4)	Lpe			
	Lkge	Kr(2)	Ko(2;1)	L(k)(2)	Lpe(1;2)			
	Lkje(3)	Kr(3)	Ko(2;3)	L(k)(2;1)	Lpe(2)			
	Lkn(1)	Kr(4)	Ko(3)	L(k)(2;3)	Lpe(3)			
		Kre	Ko(3;1)	L(k)(2;4)	Lpe(g)			
		Krje(2)	Ko(3;2)	L(k)(3)	Lpje(2)			
			Ko(3;4)	L(k)(3;4)				
			Ko(3;4)	L(k)(3;1)				
			Ko(4)	L(k)(3;2)				
			Ko(4;2)	L(k)(3;4)				
			Ko(g)	L(k)(4)				
			Koe	L(k)(4;3)				
			Koe(2)	L(k)(g)				
			KoeKe	L(k);				
			Kor	L(k)n				
			Kor(g)	L;				
				L0				
				Lgn				
				Ln				
				Ls				
				Ls(1)				
				Ls(1;2)				
				Ls(2)				
				Ls(2;1)				

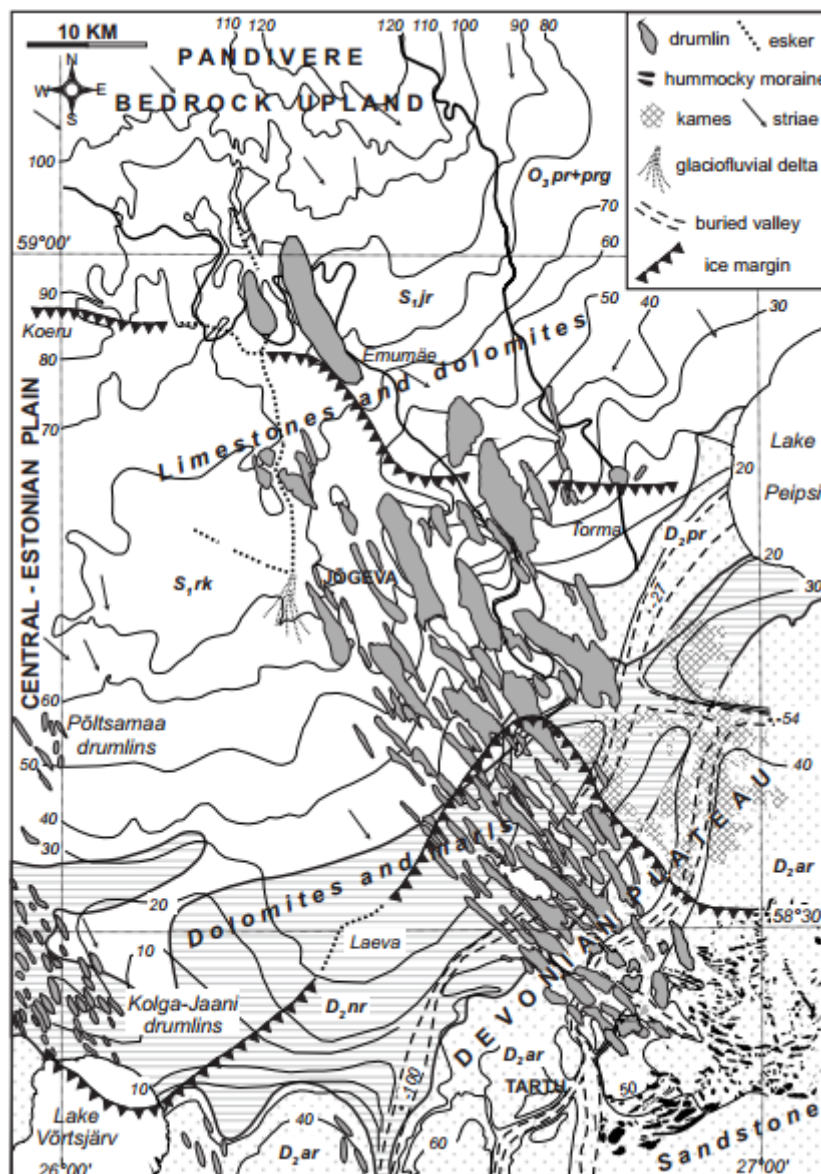
				Ls(3)				
				Ls(3;1)				
				Ls(4)				

Lisa 2. Voorte vahelist ala märkivad mullad värvikoodide ja neile vastavate muldade šifritega.

värvikood	3	7	9	10	11	13	14	15	16	17	19	20
š i f f e r	Kh77	LPg	LG	LG1	R	Gh77	G	AG	G1	M777	Dg	Pp
	Kh77(1)	LPg(1)	LG1n		R7	Gh77a	G(1)	Ag	Go1	AM	D	TxS777
		LPg(2)	LGn		R77		G1; LPG	AG1	Go1a	AM7	DGal(2)	Av
		LPg(3)	LkG		R777		G1al			AM77	D(2)	TxR777
		LPgd	LkG(1)		R777õ		Ga			AM777	D(1)	Ppg
		LPgF	LkGn		Rõ		Gal			AM777õ	Dg(1;3)	Tx
			LPG		S		Gal(1)			M	DG(2)	Tz
			LPG(1)		S7		Gk			M7	D(g)	Txg
					S77		Gkr			M77	Dg(1)	TyG
					S777		Go			M77;M7	D(1;2)	TxM777
					S777(1)		Go(1)			M777		Ty
					S777õ		Go(2)			M777(1)		TmG
							Goa			M7777		TxM
							Goal			M777a		TxM77
							Goal(1)			M777al		TxM7
							Goal(1;2)			M777al(1)		Tx(2)
							Goal(2)			M777d		Pp(2)
							God			M777õ		C
							Gor			M77a		Pp(1;2)
							TzG			M77al		
										M77d		
										M77õ		
										M7a		
										M7al		
										M7d		
										M7M77		

										TzM		
										TzM7		
										TzM77		
										TzM777		
										TzM _a		

Lisa 3. Rattase (2004) kaardistatud voored.



Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Risto Ülem,

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Võimalikud viisi voorte tuvastamiseks GIS tarkvaraga LiDARi kõrgusmodelilt,
(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on Raivo Aunap,

(juhendaja nimi)

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus **23.05.2015**